

Tuure Nuotio

**MAGNEETTIKENTÄN MITTAAMINEN  
SUURJÄNNITTEISEN  
TASASÄHKÖKAAPELIN TARKASSA  
VIANPAIKANNUKSESSA**

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Diplomityö  
Huhtikuu 2019

# TIIVISTELMÄ

**TUURE NUOTIO:** Magneettikentän mittaaminen suurjännitteisen tasasähkökaapelin tarkassa vianpaikannuksessa

Tampereen yliopisto

Diplomityö, 90 sivua, 5 liitesivua

Huhtikuu 2019

Sähkötekniikan diplomi-insinööri tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat

Tarkastajat: projektipäällikkö Pertti Pakonen, dosentti Kari Lahti

Avainsanat: HVDC, kaapeli, karkea vianpaikannus, tarkka vianpaikannus, magneettikentän mittaaminen, fluxgate-magnetometri

Suurjännitteiset tasasähkökaapelit ovat HVDC-yhteyksien (HVDC, High Voltage Direct Current) kriittisimpiä komponentteja, sillä niiden vikaantuminen aiheuttaa siirtokapasiteetin menetyksen usein pitkäksi aikaa. Kaapelivikojen tarkka paikantaminen on tärkeää, jotta yhteys saadaan mahdollisimman nopeasti takaisin sähkömarkkinoiden käyttöön.

Fingridillä aiemmin käytössä olleet tarkat vianpaikannusmenetelmät eivät ole aina toimineet luotettavasti eikä vianpaikannusprosessiin ole vakioitunut yhtä tiettyä menetelmää kuten karkeassa vianpaikannuksessa. Lisäksi kaapeleita on jouduttu katkaisemaan ilman tarkkaa tietoa vian todellisesta sijainnista, koska käytössä olleilla tarkoilla vianpaikannusmenetelmillä ei ole saatu paikannettua vian täsmällistä sijaintia. Nämä tekijät lisäävät kustannusriskejä, minkä vuoksi uuden tarkan menetelmän tutkiminen on välttämätöntä.

Työssä tutkitaan magneettikenttien mittaamista suurjännitteisten tasasähkökaapeleiden tarkassa vianpaikannuksessa, jolloin kaapelivika voidaan havaita magneettikentän muutoksesta vian kohdalla. Menetelmää tarkasteltiin eri kaapelivikatyypin ja vian sijainnin näkökulmasta, minkä lisäksi pyrittiin arvioimaan menetelmään liittyvien häiriöiden vaikutusta paikannustulokseen. Menetelmän soveltuvuutta ja työssä käytettävän laitteiston toimivuutta arvioitiin myös mittaamalla käytössä olevien tasasähkökaapeleiden muodostamaa magneettikenttää erilaisilla mittaustavoilla.

Työn johtopäätöksenä voidaan sanoa, että kaapelin magneettikenttiä mittaamalla voidaan havaita luotettavasti kaapeleissa esiintyvät pieniresistanssiset rinnakkaisviat, joissa magneettikentän muutokseen havaittavuus on suuri. Fingridin nykyisellä laitteistolla ei kuitenkaan pystytä luotettavasti paikantamaan tarkasti kaapeleilla esiintyviä vikoja ilman laitteistoon tehtäviä lisäinvestointeja. Lisäksi laitteiston toimivuutta ja sen käyttötapoihin liittyviä vaihtoehtoja pitäisi testata erillisen vianpaikannusharjoituksen avulla ennen oikean kaapelin tarkkaa vianpaikannusta.

## ABSTRACT

**TUURE NUOTIO:** Magnetic field measurement in fault pinpointing of high voltage direct current transmission cable

Tampere University

Master of Science Thesis, 90 pages, 5 Appendix pages

April 2019

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Power Systems and Markets

Examiner: Project Manager Pertti Pakonen, Senior Scientist Kari Lahti

Keywords: HVDC, cable, fault pre-location, fault pinpointing, magnetic field method, fluxgate magnetometer

High voltage direct current (HVDC) cables are one of the most critical components of HVDC interconnections because a cable fault will often cause a loss in the transmission capacity for a long time. Fault pinpointing is important in order to get the transmission capacity back to the use of electricity markets as quickly as possible.

Fingrid's previously used fault pinpointing methods have not always worked reliably and none of those methods have become standardized in the fault location process unlike the methods used in the fault pre-location. Used pinpointing methods have not always been accurate enough which has led to the cut of the cable without knowing the accurate location of the fault. Due to aforementioned factors which increase the cost risks of the cable fault, a new pinpointing method for cable fault location need to be studied.

In the thesis, the magnetic field method is studied in the fault pinpointing of HVDC cables where the fault is located to the area where the cable magnetic field changes. The method was considered for different kinds of cable faults and for different locations of the cable fault. In addition, the aim was to estimate the disturbances which will affect the cable fault location accuracy. The suitability of the method and the equipment used in this thesis was also estimated by measuring the magnetic fields of HVDC cables in operation by using different kinds of measuring methods.

In conclusion, low resistance shunt faults in cables can be pinpointed accurately by using the magnetic field method since the change in the magnetic field at the fault point can be detected reliably. However, the faults cannot be pinpointed reliably with the Fingrid's existing equipment without additional investments to the equipment. Furthermore, the suitability of the equipment and the different ways of using it should be tested by arranging a separate fault pinpointing exercise before a real cable fault pinpointing situation.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:lle. Työn ohjaajana Fingridillä toimi Sallamaria Iltanen ja tarkastajina Tampereen yliopistosta projektipäällikkö Pertti Pakonen ja dosentti Kari Lahti. Lisäksi työn ohjausryhmään kuuluivat Fingridillä Tuomas Rauhala, Jussi Rantanen ja Juhani Tammi.

Haluan erityisesti kiittää työn ohjaaja Sallamaria Iltasta työhön käytetystä ajasta, asiantuntevista kommentteista ja mittausten suorittamisesta. Kiitokset myös työn tarkastajille Pertti Pakoselle ja Kari Lahdelle työn kommentoinnista.

Lisäksi haluan kiittää ohjausryhmääni työhön liittyvistä kommentteista sekä muita Fingridin työntekijöitä, jotka auttoivat työn tekemisessä. Haluan myös kiittää työssä käytettävän laitteiston valmistajan Aquadyne AS:n henkilökuntaa aktiivisesta yhteydenpidosta kysymyksiin ja ongelmiin liittyen.

Kiitos myös HVDC- ja FACTS -yksikön työntekijöille avuliaasta ja viihtyisästä työympäristä.

Helsinki, 17.4.2019

Tuure Nuotio



# SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto . . . . .	1
1.1 Työn tausta . . . . .	1
1.2 Työn sisältö ja tavoitteet . . . . .	2
1.3 Työn rakenne . . . . .	3
2. Suomen kantaverkon suurjännitteiset tasasähköyhteydet . . . . .	4
2.1 Suurjännitteisen tasasähköyhteyden rakenne . . . . .	4
2.2 Fingridin tasasähköyhteydet . . . . .	6
2.2.1 Fenno-Skan 1 . . . . .	7
2.2.2 Fenno-Skan 2 . . . . .	8
2.2.3 EstLink 1 . . . . .	8
2.2.4 EstLink 2 . . . . .	9
2.3 Tasasähköyhteyksien keskeytysten merkitys kantaverkossa . . . . .	9
2.4 Fingridin tasasähköyhteyksien kaapelit . . . . .	11
2.4.1 Tasasähkökaapelin rakenne yleisesti . . . . .	11
2.4.2 Fingridin tasasähkökaapeleiden rakenne . . . . .	12
2.5 Tasasähköyhteyksien kaapeliviat . . . . .	15
3. Suurjännitteisen tasasähkökaapelin vianpaikannus . . . . .	19
3.1 Vianpaikannusprosessi . . . . .	19
3.2 Tarkka vianpaikannus maalla . . . . .	22
3.3 Tarkka vianpaikannus merellä . . . . .	22
3.4 Vianpaikannuksen riskit ja riskienhallinta . . . . .	23
3.4.1 Riskien tunnistaminen . . . . .	23
3.4.2 Riskien vaikutukset ja hallinta . . . . .	25
3.4.3 Vianpaikannuksen epäonnistumisen esimerkkitapauksia . . . . .	26
4. Suurjännitteisen tasasähkökaapelin vianpaikannusmenetelmät . . . . .	28
4.1 Karkean vianpaikannuksen menetelmät . . . . .	28
4.2 Karkean vianpaikannuksen rajoitteet . . . . .	32
4.3 Tarkat vianpaikannusmenetelmät . . . . .	32

4.3.1	Akustinen menetelmä . . . . .	33
4.3.2	Askeljännitteen mittaus . . . . .	34
4.3.3	Magneettikentän mittaus . . . . .	35
4.4	Tarkan vianpaikannuksen epävarmuustekijät . . . . .	37
5.	Suurjännitteisen tasasähkökaapelin magneettikentän muodostuminen ja mittaaminen . . . . .	39
5.1	Magneettikentän muodostuminen tasasähkökaapelissa . . . . .	39
5.1.1	Yksijohdinkaapeli . . . . .	40
5.1.2	Koaksiaalikaapeli . . . . .	43
5.2	Magneettikentän muutoksen havaittavuus kaapelivian ympäristössä . . . . .	44
5.3	Kaapelin magneettikentän mittaaminen . . . . .	46
5.3.1	Mittauksen suorittaminen kaapelivian aikana . . . . .	47
5.3.2	Häiriöt . . . . .	50
5.3.3	Häiriöiden vaikutusten minimointi . . . . .	51
5.4	Fluxgate-magnetometrin toimintaperiaate . . . . .	53
5.5	Magneettikentän mittaamisessa käytettävät laitteet . . . . .	56
5.5.1	Signaalin syöttäminen . . . . .	56
5.5.2	Aquadyne-kaapelivianpaikannuslaite . . . . .	57
5.5.3	Vianpaikannuslaitteen käyttötavat . . . . .	59
6.	Suurjännitteisen tasasähkökaapelin paikantaminen magneettikenttää mittaamalla . . . . .	63
6.1	Mittausjärjestelyt . . . . .	63
6.2	Fenno-Skan 1 ja 2 . . . . .	65
6.3	EstLink 1 . . . . .	70
6.4	EstLink 2 . . . . .	72
7.	Johtopäätökset ja jatkokehitys . . . . .	77
7.1	Magneettikentän mittauksen soveltuvuus tarkkaan vianpaikannukseen . . . . .	77
7.2	Vianpaikannuslaitteen soveltuminen ja jatkokehitystarpeet . . . . .	78
7.3	Vianpaikannusprosessin kehittäminen . . . . .	79
8.	Yhteenveto . . . . .	81
	Lähteet . . . . .	84

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

## LYHENTEET

AIS	Automated Information System, laivojen tunnistus ja paikannus -järjestelmä
AC	Alternating Current, vaihtovirta
DC	Direct Current, tasavirta
HVDC	High Voltage Direct Current, suurjännitteinen tasasähkö
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators of Electricity, eurooppalaisten kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestö
GPS	Global Positioning System, maailmanlaajuinen paikallistamisjärjestelmä
IRC	Integrated Return Conductor, kaapelin integroitu paluujohdin
LCC	Line Commutated Converter, verkkokommutoiva suuntaaja
MIND	Mass Impregnated Non-Draining, massakyllästeinen valumaton
OLT	Open Line Test, avoimen johdon jännitekoe
ROV	Remote Operated Vehicle, vedenalainen kauko-ohjattu alus
RTE	Réseau de Transport d'Électricité, Ranskan kantaverkkoyhtiö
SEM	Subsea Electronics Module, AD-muunnin
SWG	Surge Wave Generator, syöksyaaltogeneraattori
TDR	Time Domain Reflectometry, aikatazon heijastusmittaus
USBL	Ultra-Short BaseLine, vedenalainen akustinen paikannusjärjestelmä
VSC	Voltage Source Converter, jännitelähdesuuntaaja
XLPE	Cross-Linked Polyethylene, ristosilloitettu polyeteeni

## MERKINNÄT

$a$	kaapeleiden keskipisteiden välinen etäisyys
$A$	suljetun silmukan pinta-ala
$B$	magneettivuontiheys
$B_{\text{ext}}$	ulkoinen magneettivuon tiheys
$B_{\text{tot}}$	magneettivuon tiheyden kokonaisarvo
$B_x$	magneettivuon tiheyden x-komponentti
$B_y$	magneettivuon tiheyden y-komponentti
$B_z$	magneettivuon tiheyden z-komponentti
$C$	kapasitanssi
$d$	päivä
$d$	mittauspisteen etäisyys maantasosta

$\frac{d\mathbf{B}}{dt}$	magneettivuontiheyden aikaderivaatta
$d\mathbf{l}$	integroititie
$\frac{d\phi}{dt}$	magneettivuon aikaderivaatta
$f$	taajuus
$G$	galvanometri
$h$	tunti
$h$	hautausvyvyys
$\mathbf{H}$	magneettikentän voimakkuus
$\mathbf{H}_{\text{ext}}$	ulkoinen magneettikentän voimakkuus
$I$	virta
$I_{\text{encl}}$	pääjohtimen ja paluujohtimen erovirta
$I_{\text{exc}}$	herätevirta
$I_i$	syöttövirta
$I_r$	paluuvirta
$I_g$	maavirta
$I_{\text{sea}}$	merivirta
$l$	mitattu etäisyys
$l_x$	vian etäisyys mittauspaikasta
$N$	käämikierrosluku
$r$	etäisyys kaapelin keskipisteestä
$r_a$	johtimen säde
$r_b$	kaapelin säde paluujohtimeen asti
$r_c$	kaapelin säde
$R$	resistanssi
$R_F$	vikaresistanssi
$S$	kipinäväli
$t$	aika
$v$	etenemisnopeus
$V$	jännite
$V_{\text{ind}}$	indusoitunut jännite
$V_x$	x-suuntaan indusoitunut jännite
$V_y$	y-suuntaan indusoitunut jännite
$V_z$	z-suuntaan indusoitunut jännite
$X_c$	kapasitiivinen reaktanssi
$\alpha$	mittauspisteen ja kaapelin välinen kulma
$\mu$	permeabiliteetti
$\mu_0$	tyhjiön permeabiliteetti
$\mu_r$	suhteellinen permeabiliteetti

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta

Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj (jatkossa Fingrid) vastaa osaltaan Ruotsin ja Viron kantaverkkoon liitetyistä suurjännitteisistä tasasähköyhteyksistä. Tasasähköyhteyksien keskeisimpänä tarkoituksena on lisätä Suomen voimajärjestelmän rajasiirtokapasiteettia. Tasasähköyhteyksien merkitys on kasvamassa tulevaisuudessa johtuen ilmastonmuutoksen aiheuttamasta energiajärjestelmän murroksesta. Säästä riippuvainen tehontuotanto aiheuttaa voimajärjestelmään suuria ajallisia tehonvaihteluita, jolloin puuttuva sähköntuotanto voidaan korvata tasasähköyhteyksien siirtokapasiteetin avulla. [1] Tasasähkökaapelit ovat tasasähköyhteyksien komponentteja, joiden vikaantuminen aiheuttaa aina rajasiirtokapasiteetin menetyksen [2]. Menetetty siirtokapasiteetti saadaan nopeammin takaisin käyttöön parantamalla tasasähkökaapeleiden käytettävyyttä ja siten varmistetaan voimajärjestelmän tehonvaihteluiden tasaaminen. Etenkin tasasähkömerikaapeleiden vikaantuminen aiheuttaa pitkäkestoisen tasasähköyhteyden rajasiirtokapasiteetin menetyksen vaikean korjattavuuden vuoksi.

Kaapeliviat ovat usein vaikeita paikantaa ja vaativat usein pitkän korjausajan. Vian nopea paikantaminen on tärkeää, jotta siirtokapasiteetti saataisiin takaisin käyttöön nopeasti ja vikaantumisesta aiheutuneet kustannukset pystyttäisiin minimoimaan. [3] Tasasähköyhteyksien kaapelivikojen nopea paikannus on myös pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden Fingridin, Svenska Kraftnätin, Ståtnetin ja Energinetin mukaan pohjoismaisten tasasähköyhteyksien käytettävyyden keskeisimpiä parannuskohteita [1].

Paikantamisen nopeuden lisäksi vika tulee paikantaa mahdollisimman tarkasti. Vian tarkalla paikantamisella minimoidaan kaapelin katkaisuun liittyvät kustannusriskit. Tarkka vianpaikannus on erittäin tärkeä osa vianpaikannusprosessia, jolloin myös tarkkojen vianpaikannusmenetelmien tulee olla mahdollisimman luotettavia. [4, 5] Aiemmin käytössä olleiden tarkkojen vianpaikannusmenetelmien sijasta tässä työssä tarkastellaan uutta magneettikenttien mittaukseen perustuvaa menetelmää, sen soveltuvuutta ja luotettavuutta erilaisissa kaapelivikatilanteissa. Magneettikentän mittaukseen perustuvassa menetelmässä tarkka vianpaikannus suoritetaan mittaamalla kaapelin aiheuttamaa magneettikenttää ja vianpaikannus perustuu magneettikentän muutoksen havaitsemiseen kaapelin vikakohdassa [6].

Tarkassa vianpaikannuksessa tutkittava alue määritetään suorittamalla ensin vian karkea paikannus. Fingridin kaapelivikojen karkea vianpaikannus on suoritettu TDR-mittauksella (Time Domain Reflectometry) ja vian polttamisen yhdistelmällä. Tarkka vianpaikannus on suoritettu tähän asti akustisilla menetelmillä ja visuaalisella tarkistuksella sukeltajan tai ROV:n (Remotely Operated Vehicle) avulla, mutta näillä menetelmillä ei ole aina saatu luotettavaa tulosta [7]. Lisäksi tarkan menetelmän tavoin on käytetty TDR-mittausta kaapelin katkaisemisen jälkeen [7], mutta tämän menetelmän käyttämistä pidetään viimeisenä vaihtoehtona vian tarkkaan paikantamiseen [6]. Edellä kuvatun menetelmän riskinä on, että kaapelin katkaisu tapahtuu kaukana todellisesta vikapaikasta ilman tarkkaa tietoa vian sijainnista, jolloin kaapelin varaosien kustannukset kasvavat ja korjaukseen kuluva aika pitenee [4].

Tämä diplomityö tehdään osana Fingridin laajempaa tasasähkökaapeleiden vianpaikannus ja viankorjausvalmius -kokonaisuuden kehittämistyötä. Kokonaisuuden kehittämällä parannetaan vianpaikannukseen ja viankorjausvalmiuteen liittyvää ohjeistusta sekä henkilöstön osaamista ja toimintavalmiutta vikatilanteissa.

## 1.2 Työn sisältö ja tavoitteet

Työn ensisijaisena tavoitteena on selvittää, voidaanko magneettikenttää mittaamalla paikantaa kaapelivika tarkasti Fingridin suurjännitteisillä tasasähkökaapeleilla. Tavoitteena on myös selvittää mille kaapeleille ja kaapelivioille magneettikentän mittaukseen perustuvan menetelmän käyttäminen soveltuu. Lisäksi työssä pyritään selvittämään minkälaisia vikoja magneettikentän mittaukseen perustuvalla menetelmällä ei pystytä paikantamaan hyvällä tarkkuudella tai ollenkaan. Tästä johtuen tutkitaan myös tekijöitä, jotka vaikuttavat tarkan vianpaikannuksen onnistumiseen tai epäonnistumiseen magneettikenttien mittauksessa. Työssä tutkitaan myös Fingridin magneettikentän mittaukseen käytettävää vianpaikannuslaitteistoa ja sen soveltuvuutta magneettikentän mittaukseen perustuvassa menetelmässä. Työn rinnakkaisena tavoitteena on selvittää, miten vianpaikannusprosessia voitaisiin kehittää karkean ja tarkan vianpaikannuksen näkökulmasta. Tähän liittyen on oleellista selvittää, miten erityyppisiä kaapelivikoja paikannetaan tehokkaasti ja luotettavasti.

Työssä tutkitaan Fingridin suurjännitetasasähköyhteyksien kaapeleiden vianpaikannusprosessia ja magneettikentän mittaukseen perustuvan menetelmän käyttämistä kaapelivian tarkkaan paikantamiseen. Työssä käsitellään Fingridin tasasähköyhteyksien mahdollisia erilaisia kaapelivikoja, koska näiden ymmärtäminen on tärkeää vianpaikannuksen onnistumisen kannalta. Vianpaikannusprosessia tutkitaan myös vikapaikan sijainnin näkökulmasta, koska kaapeleiden tarkkoja vianpaikannusmenetelmiä sovelletaan eri tavoin maa- ja merikaapeleille.

Karkean vianpaikannuksen yhteydessä käsitellään Fingridin nykyisten karkeiden vianpaikannusmenetelmien lisäksi myös vaihtoehtoisia vianpaikannusmenetelmiä, joilla voidaan parantaa karkean vianpaikannuksen tehokkuutta. Tarkka vianpaikannus on aina karkean vianpaikannuksen jälkeen suoritettava vaihe, joten tarkastelunäkökulmana on, miten karkea vianpaikannus vaikuttaa tarkan vianpaikannuksen onnistumiseen. Tarkoituksena on myös tutkia tekijöitä, jotka vaikuttavat tarkan vianpaikannuksen nopeuteen ja tarkkuuteen erilaisten tarkkojen vianpaikannusmenetelmien kohdalla sekä yleisesti.

### 1.3 Työn rakenne

Luvussa 1 esitetään työn sisältö, tehdyt tutkimukset ja työn tavoitteet. Luvussa 2 käsitellään tasasähköyhteyksien toteutusperiaatteita, esitellään Suomen kantaverkon suurjännitteiset tasasähköyhteydet ja niiden merkitys Suomen kantaverkossa. Lisäksi luvussa käydään läpi sähkönsiirtoon käytettävien tasasähkökaapeleiden rakenteet ja asennustavat, sekä niissä esiintyviä vikoja.

Luvussa 3 esitellään yleisesti tasasähkökaapeleiden vianpaikannuksen prosessi sekä erikseen maalla ja merellä suoritettava tarkka vianpaikannus. Luvun viimeisessä osiossa käsitellään vianpaikannukseen liittyviä riskejä, niiden vaikutuksia ja esitellään esimerkitapauksia tarkan vianpaikannuksen epäonnistumisesta. Vianpaikannuksen prosessin jälkeen luvussa 4 tarkastellaan karkeita ja tarkkoja vianpaikannusmenetelmiä. Karkean vianpaikannuksen osiolla pyritään osoittamaan lukijalle tarkan vianpaikannuksen tarpeellisuus. Tarkan vianpaikannuksen yhteydessä käsitellään magneettikentän mittauksen lisäksi muutamia eri tarkkoja vianpaikannusmenetelmiä. Lisäksi luvussa käydään läpi tekijöitä, jotka aiheuttavat epävarmuutta tarkkaan vianpaikannukseen.

Luvussa 5 tarkastellaan magneettikenttien muodostumista Fingridin kaapelirakenteissa ja magneettikentän voimakkuuden muuttumista kaapelivikojen kohdalla. Lisäksi luvussa tarkastellaan kaapeleiden magneettikentän mittauksen periaatetta, mittauksessa esiintyviä mittaushäiriöitä ja niiden minimointia. Luvussa käydään läpi myös tarkemmin fluxgate-magnetometrin toimintaperiaate. Lisäksi luvussa esitellään magneettikentän mittaamisessa käytettäviä laitteita. Luvussa 6 esitetään työssä käytettävältä laitteistolta saatuja mitaustuloksia käytössä olevilta kaapeleilta. Luvussa 7 käsitellään magneettikentän mittauksen perustuvan menetelmän ja työssä käytettävän laitteiston soveltuvuutta tarkasteltujen kaapeleiden vikojen paikannukseen luvun 5 tarkastelujen ja luvun 6 saatujen tulosten perusteella. Lisäksi luvussa käydään läpi vianpaikannusprosessin kehittämistä.

## 2. SUOMEN KANTAVERKON SUURJÄNNITTEISET TASASÄHKÖYHTEYDET

Tämä luku esittelee Suomen kantaverkon suurjännitteiset tasasähköyhteydet, niiden rakenteet ja merkityksen kantaverkossa. Lisäksi kappaleessa perehdytään tarkemmin Fingridin tasasähköyhteyksien kaapeleihin ja niissä esiintyviin vikoihin, joiden ymmärtäminen on tärkeää vianpaikannuksen kannalta. Tässä työssä käsitellään Fingridin omistuksessa olevia tasasähköyhteyksiä, joissa sähkönsiirtoon käytetään merikaapeleita, maakaapeleita ja avojohtoja. Työssä keskitytään kuitenkin vain tasasähköyhteyksien meri- ja maakaapeleiden tarkasteluun. Tästä eteenpäin puhuttaessa kaapelista, tarkoitetaan sillä suurjännitteistä tasasähkökaapelia, ellei toisin mainita.

### 2.1 Suurjännitteisen tasasähköyhteyden rakenne

Suurjännitteisellä tasasähköyhteydellä eli HVDC-yhteydellä (HVDC, High Voltage Direct Current) tarkoitetaan järjestelmää, jossa sähkö siirretään tasasähkönä perinteisen sähköverkossa käytetyn kolmivaiheisen vaihtosähkön sijaan. Suurjännitteisen tasasähkönsiirron käyttäminen riippuu teknistaloudellisista näkökulmista ja sen käyttäminen voidaan yleisesti olettaa kannattavaksi kun:

- Siirtoyhteydet ovat pitkiä, >1000 km
- Merikaapeliyhteydet ovat pitkiä, >100 km
- Maakaapeliyhteydet ovat pitkiä
- Eri synkroniverkot liitetään yhteen

Teknisestä näkökulmasta pitkillä siirtoyhteyksillä vaihtosähköverkon reaktanssi rajoittaa pätötehon siirtokapasiteettia aiheuttaen kulma- ja jännitestabiiliusongelmia, mutta tasasähköllä toteutetun sähkönsiirron siirtokapasiteettia eivät rajoita sähköverkon stabiiliusongelmat. Vaihtosähkökaapelit tuottavat verkkoon kapasitiivista loistehoa, jota täytyy kompensoida, koska ilman kompensointia kaapelin siirtokapasiteetti kuluisi pelkän loisvirran siirtämiseen tietyn kaapelipituuden jälkeen. Pitkät maakaapeliyhteydet voidaan



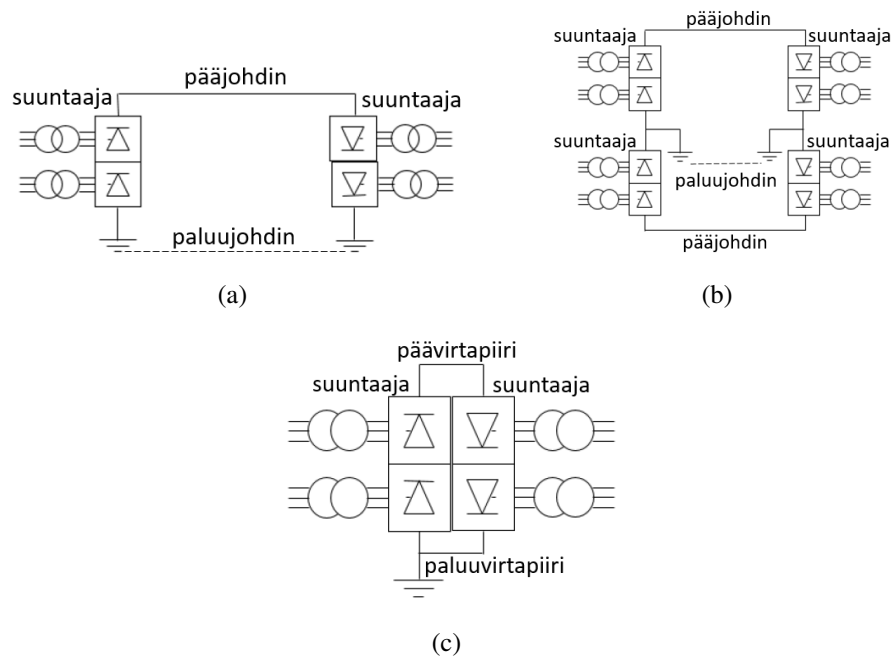
toteuttaa vaihtosähkökaapeilla, koska loistehon kompensointi on mahdollista. Pituuden kasvaessa tämä ei kuitenkaan ole teknistaloudellisesti kannattava vaihtoehto, koska suurilla jännitteillä loistehon kompensoinnin tarve kasvaa. Pitkissä merikaapeliyhteyksissä tasasähkönsiirto on käytännössä ainoa tapa, koska loistehon kompensointi on hyvin hankalaa merellä. Tasasähkökaapelit eivät tuota loistehoa verkkoon, koska kaapeleissa kulkeva virta on tasavirtaa. [8]

Tasasähköyhteydellä tarvitaan vain yksi tai kaksi johdinta kun taas vastaavasti kolmivaiheinen vaihtosähköyhteys tarvitsee aina kolme johdinta. Tasasähköyhteyden aiheuttamat kustannukset ovat tietyn siirtopituuden jälkeen pienemmät kuin vaihtosähköyhteydellä, koska tasasähköyhteyksien suuntaaja-asemien kustannukset saadaan katettua pienempien johdinmäärien, pienempien siirtohäviöiden ja loistehon kompensointitarpeen poistumisen vuoksi. Tasasähköyhteyden käyttäminen on lisäksi teknistaloudellisesti kannattavin vaihtoehto eri synkroniverkkojen yhdistämiseen. [8, 9]

HVDC-yhteyden rakenne voidaan toteuttaa monopolaarisena, bipolaarisena tai back-to-back -rakenteena, jotka on esitetty kuvassa 2.1. Monopolaarinen yhteys voidaan toteuttaa asymmetrisenä tai symmetrisenä yhteytenä. Asymmetrinen monopolaarinen yhteys koostuu kahdesta suuntaaja-asemasta sekä pää- ja paluuvirtapiiristä. Virran paluureittinä käytetään merta tai maata, jolloin yhteyden molemmissa päissä tulee olla elektrodit. Asymmetrisessä yhteydessä paluuvirtapiiriin eristystaso voi olla pienempi kuin päävirtapiiriin, koska se on pieni-impedanssisesti maadoitettu, jolloin vaihtoehtoisesti voidaan käyttää metallista paluujohdinta elektrodien sijaan. Symmetrinen monopolaarinen yhteys muodostuu kahdesta suurjännitteisestä johtimesta, joiden jännitteiden polariteetit ovat yhtä suuret, mutta vastakkaismerkkiset. [8, 10]

Bipolaarisessa yhteydessä on kaksi pääjohdinta, minkä lisäksi yhteydessä on paluupiiri monopolaarisen yhteyden tavoin. Bipolaarisen yhteyden voidaan ajatella koostuvan kahdesta rinnakkain kytketystä monopolaarisesta yhteydestä, jolloin suuntaaja-asemilla tarvitaan kaksi suuntaajaa. Bipolaarisen yhteyden hyvänä puolena on järjestelmän redundanttisuus, koska yhteyden käyttöä voidaan jatkaa monopolaarisena toisen siirtoyhteyden vikaantuessa. [8, 10]

Back-to-back -yhteys koostuu suuntaaja-asemista, jotka sijaitsevat fyysisesti samalla asemalla, jolloin yhteydellä ei tarvita siirtojohtoa. Back-to-back -rakennetta käytetään tyyppillisesti kahden eri nimellistaajuuksien omaavien vaihtosähköverkkojen väliseen tehonsiirtoon. [11]



**Kuva 2.1.** Suurjännitteisen tasasähköyhteyden rakenteet a) monopolaari b) bipolaari c) back-to-back, muokattu lähteestä [10].

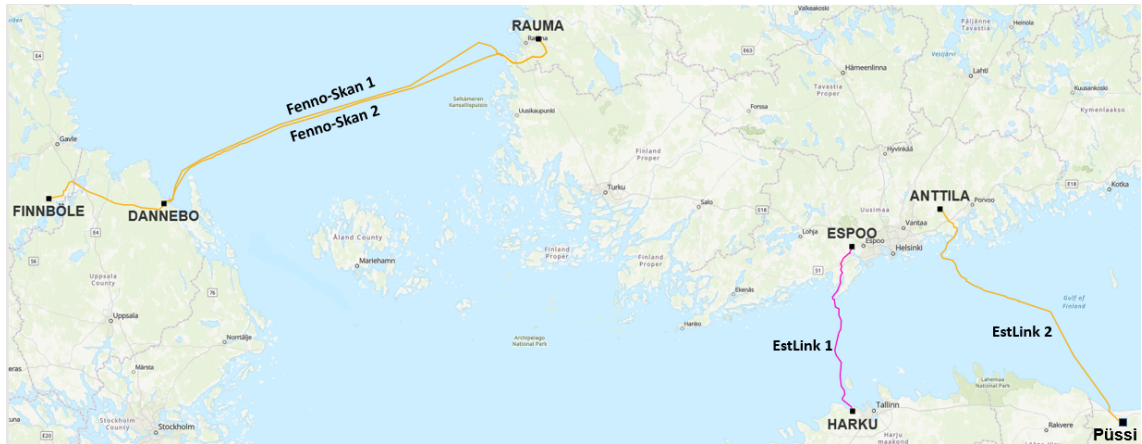
Suuntaaja-aseman rakenteeseen ja käytettävän kaapelin valintaan vaikuttaa käytetty suuntaajateknologia. HVDC-järjestelmä voidaan toteuttaa joko tyristoriteknologialla (LCC, Line Commutated Converter) tai transistoriteknologialla (VSC, Voltage Source Converter). LCC-tasasähköyhteyksissä sähkö suunnataan tyristoreilla, jolloin siirrettävän tehon suunnanmuutos tapahtuu jännitteen polariteettia vaihtamalla. Tyristorit johtavat virtaa vain toiseen suuntaan, jolloin yhteyden pääpiirin virran suunta on aina sama. [8]

VSC-yhteys on toteutettu transistoreilla, jotka voivat johtaa virtaa molempiin suuntiin. Tehon suunnan muutos tapahtuu virran suuntaa muuttamalla, jolloin jännitteen polariteetti ei vaihtele kaapelissa, minkä vuoksi voidaan käyttää myös muovieristeistä kaapelia. [8] Muovieristeisiä kaapeleita ei ole ennen voinut käyttää LCC-yhteyksissä, koska muovieristeisissä kaapeleissa tasajännite kerääntyy varauksia, jotka voivat aiheuttaa suuria paikallisia jänniterasituksia kaapelin eristeeseen, kun polariteettia vaihdetaan [9]. Jännitteen polariteetin vaihdossa kriittinen kentänvoimakkuus voi ylittyä tietyssä kohtaa kaapelin eristettä aiheuttaen läpilyönnin. Kehittyneiden eristemateriaalien vuoksi muovikaapeleita voidaan käyttää nykyään myös LCC-yhteyksissä [12].

## 2.2 Fingridin tasasähköyhteydet

Fingridin omistaa yhdessä Svenska kraftnätin kanssa Fenno-Skan 1 ja Fenno-Skan 2 -HVDC-yhteydet ja Viron kantaverkkoyhtiö Elering AS:n kanssa EstLink 1 ja EstLink 2 -HVDC-yhteydet, joiden rajasiirtokapasiteetti on yhteensä 2200 MW. Lisäksi Suomen kantaverkkoon liittyy Viipurin linkki, jonka omistaa Venäjän kantaverkkoyhtiö Federal

Grid Company ja Ål-link, jonka omistaa Ahvenanmaan energiayhtiö Kraftnät Åland AB. Viipurin linkki on toteutettu back-to-back rakenteella ja Ål-link symmetrisellä monopolaari rakenteella. Fingridin omistamat tasasähköyhteydet ovat esitetty kuvassa 2.2.



**Kuva 2.2.** Fingridin omistamat suurjännitteiset tasasähköyhteydet, muokattu lähteestä [13].

Taulukossa 2.1 on koottuna Fingridin suurjännitteisten tasasähköyhteyksien kaapeleiden tekniset tiedot. Yhteyksien tekniset tiedot ovat nimellisarvoja, joilla kaapeli voidaan kuormittaa jatkuva-aikaisesti, mutta käytännössä sähkömarkkinat määräävät tehonsiirtotarpeen.

**Taulukko 2.1.** Fingridin suurjännitteisten tasasähköyhteyksien tekniset tiedot, perustuu lähteisiin [14, 15, 16].

<b>Kaapeli</b>	<b>Siirtokapasiteetti (MW)</b>	<b>Nimellijännite (kV)</b>	<b>Nimellisvirta (A)</b>	<b>Pituus (km)</b>
Fenno-Skan 1	400	320	1316	201
Fenno-Skan 2	800	500	1660	196
EstLink 1 meri + maa	350	150	1230	2×105 + 2×31
EstLink 2 meri + maa	650	450	1490	145 + 2×12

## 2.2.1 Fenno-Skan 1

Fenno-Skan 1 on Suomen kantaverkon ensimmäinen HVDC-yhteys, mikä otettiin käyttöön vuonna 1989. Yhteydellä lisättiin Suomen ja Ruotsin välistä rajasiirtokapasiteettia 500 MW jo olemassa olevien vaihtosähköyhteyksien lisäksi. Yhteyden omistavat Fingrid ja Ruotsin kantaverkkoyhtiö Svenska kraftnät. Fenno-Skan 1 rakennettiin alun perin asymmetriseksi monopolaariseksi yhteydeksi, jossa virran paluureittinä käytettiin maata ja merta. Meren ja maaperän käyttäminen paluupiirinä vaatii yhteyden molempiin päihin elektrodit, joka Suomen puolella sijaitsee Rauman lähellä Lautakarissa. Yhteyden pituus on noin 233 kilometriä, josta noin 33 kilometriä on tasasähköavojohtoa Rauman tasavirta-aseman ja Rihtniemen kaapelipääteaseman välillä. Rihtniemessä avojohto on

kytketty merikaapeliin, joka kulkee Pohjanlahden poikki noin 200 kilometriä Ruotsiin suuntaaja-asemalle Dannebohon. Yhteyden suuntaaja-asemat ovat toteutettu LCC-tekniologialla. [14, 15]

Fenno-Skan 1 -yhteyden siirtokapasiteetti oli alun perin 500 MW ja kaapelin nimelliskäyttöjännite 400 kV, mutta linkin ajoperiaatetta on jouduttu rajoittamaan vuonna 2013 todetun mahdollisen heikentyneen kaapelieristyksen takia. Tästä johtuen kaapelin käyttöjännite on alennettu 320 kV ja siirtokapasiteetti on rajoitettu 400 MW [14]. Lisäksi kaapelin jännitteen polariteetin vaihtamiskertojen lukumäärät on minimoitu [7], koska polariteetin vaihtaminen rasittaa kaapelin eristystä [17]. Nykyään yhteyttä käytetään bipolaarisena Fenno-Skan 2:n kanssa, minkä takia polariteetin vaihtamista pystytään rajoittamaan Fenno-Skan 1 -kaapelilla. Bipolaarisessa käytössä meressä kulkeva virta on paluuvirtojen summa.

Fenno-Skan 1:n laskennallinen elinkaari päättyy 2020-luvun lopulla, jolloin on tarkoitus ottaa käyttöön uusi HVDC-yhteys Suomen ja Ruotsin välillä [18]. Korvaavaa yhteyttä suunnitellaan nykyiselle paikalle tai Merenkurkun yli Ruotsiin ja sen siirtotehoksi on suunniteltu 800 MW [14, 15, 18].

### **2.2.2 Fenno-Skan 2**

Fenno-Skan 2 on toinen Suomen ja Ruotsin välinen asymmetrinen monopolaarinen HVDC-yhteys, mikä otettiin käyttöön vuonna 2011. Fenno-Skan 2 -yhteydellä lisättiin Suomen ja Ruotsin välistä rajasiirtokapasiteettia 800 MW. Yhteys on Fingridin ja Svenska kraftnätin omistama. Yhteyden kokonaispituus on noin 299 kilometriä, josta noin 33 kilometriä on tasasähköavojohtoa Rauman tasavirta-asemalta Rihtniemen kaapelipääteasemalle kuten Fenno-Skan 1:llä. Merikaapeli kulkee noin 196 kilometriä Pohjanlahden poikki Rauman Rihtniemestä Dannebohon. Ruotsin puolella tasasähköavojohtoa on noin 70 kilometriä Dannebosta Finnbölen suuntaaja-asemalle. Ruotsissa Fenno-Skan -yhteyksien suuntaaja-asemat sijaitsevat fyysisesti eri paikoissa johtuen vaihtosähköverkon asettamista rajoitteista. Yhteyden suuntaaja-asemat ovat Fenno-Skan 1:n tavoin toteutettu LCC-tekniologialla. [15, 19]

### **2.2.3 EstLink 1**

EstLink 1 on Suomen ja Viron välinen symmetrinen monopolaarinen HVDC-yhteys, mikä otettiin käyttöön vuonna 2006. Yhteydellä liitettiin Suomen ja Viron kantaverkot yhteen ja mahdollistettiin tehonsiirto ensimmäistä kertaa suoraan pohjaismaisen ja baltialaisen sähköverkon välillä. Vuoteen 2013 saakka yhteyden omistaja oli AS Nordic Energy Link,

kunnes Fingrid ja Viron kantaverkkoyhtiö Elering ostivat yhteyden. Yhteyden suuntaaja-asetat ovat toteutettu VSC-teknologialla ja yhteyden käyttöjännite on  $\pm 150$  kV ja siirto-teho 350 MW. Kaapelireitti kulkee Espoon tasavirta-asemalta noin 22 kilometriä maakaapeleina rannikolle, josta se jatkaa noin 74 kilometriä Suomenlahden poikki merikaapeleina Viroon. Viron puolella maakaapeleita on noin 9 kilometriä Harkun suuntaaja-asetalle. [16]

## 2.2.4 EstLink 2

EstLink 2 on Fingridin ja Eleringin omistama asymmetrinen monopolaarinen HVDC-yhteys, jonka käyttöönotto tapahtui vuonna 2014. Yhteyden tärkeimpänä tarkoituksena on lisätä Suomen ja Viron välistä rajasiirtokapasiteettia. Yhteyden käyttöjännite on 450 kV ja sillä lisättiin Suomen ja Viron välistä rajasiirtokapasiteettia 650 MW. Yhteyden suuntaaja-asetat ovat toteutettu LCC-teknologialla. Suomessa suuntaaja-asema sijaitsee Porvoon Anttilassa, josta sähkö siirretään noin 14 kilometriä avojohdolla Nikuvikenin kaapelipääte-asetalle. Nikuvikenistä alkaa noin 145 kilometriä pitkä merikaapeliosuus Suomenlahden poikki Viron rannikolle. [20]

Merikaapeli on toteutettu koaksiaalikaapelina, jolloin samaan kaapeliin pääjohtimen kanssa on integroitu paluujohdin (IRC, Integrated Return Conductor). Viron rannikolla merikaapeli jakaantuu pää- ja paluukaapeleiksi, jotka jatkuvat noin 12 kilometriä Viron suuntaaja-asetalle Püssiin. Maakaapeliosuus koostuu suurjännitteisestä 450 kV pääpiirin kaapelista ja 24 kV paluupiirin kaapelista. [20]

## 2.3 Tasasähköyhteyksien keskeytysten merkitys kantaverkossa

Tasasähköyhteyksien tarve kantaverkossa perustuu suurten tehojen siirtoon alueille, jossa sähköntuotanto ei riitä kattamaan sähkönkulusta [1]. Taulukossa 2.2 on koottuna Fingridin HVDC-yhteyksien sähköntuonti Suomeen ja Suomesta sekä kokonaissähköntuotanto ja -kulutus Suomessa vuosina 2013-2017. Sähköntuonti on ollut pääosin Ruotsista Suomeen tapahtuvaa siirtoa ja vienti pääosin Suomesta Viroon tapahtuvaa siirtoa. Kuten taulukosta voidaan huomata, Suomi on hyvin riippuvainen sähköntuonnista, koska Suomen oma sähköntuotanto ei riitä kattamaan sähkönkulutusta. Vuosien 2014-2017 välillä HVDC-yhteyksillä tuodun sähkön osuus kokonaiskulutuksesta oli noin 10 %. [21, 22]

**Taulukko 2.2.** HVDC-yhteyksien sähköntuonti Suomeen ja sähkönvienti Suomesta sekä kokonaissähkönkulutus Suomessa vuosilta 2013-2017. Tiedot koottu ENTSO-E:n julkaisemista Pohjoismaiden ja Baltian maiden HVDC-yhteyksien vika- ja häiriötilastoista [22] sekä Energiateollisuuden tekemistä vuosiraporteista [21].

Vuosi	Sähköntuonti HVDC (TWh)	Sähkövienti HVDC (TWh)	Sähköntuotanto Suomessa (TWh)	Sähkönkulutus Suomessa (TWh)
2017	8,0	1,9	65,0	85,5
2016	8,7	3,1	66,2	85,1
2015	8,6	5,0	66,1	82,5
2014	8,1	3,5	65,4	83,4
2013	5,7	1,6	68,3	84,0

Ilmastonmuutoksen käynnistämä energia- ja sähköjärjestelmän murros kasvattaa entisestään tasasähköyhteyksien merkitystä sähköntuotannon ja -kulutuksen tasaamisessa. Sääolosuhteista riippuvan sähköntuotannon, kuten tuulivoiman osuuden kasvaminen ja säätökykyisen tuotannon vähentyminen, aiheuttaa sähköntuotantoon suuria ajallisia vaihteluita, joita pystytään tasaamaan tasasähköyhteyksien siirtokapasiteetin avulla. [18] Tasasähköyhteyksien luotettavuuden merkitys korostuu entisestään tulevaisuudessa, jotta suuret tehonvaihtelut saadaan tasattua ja hiilineutraalia energiantuotantoa hyödynnettyä Pohjoismaat ja Baltia tasolla [1].

Tasasähköyhteyksien hyvä luotettavuus mahdollistaa hyvän käytettävyyden. Tasasähköyhteyksien käytettävyyteen vaikuttavat pakotetut ja suunnitellut keskeytykset. Pakotetut ja suunnitellut keskeytykset voidaan jakaa kokonaiskeston mukaan lyhyisiin ja pitkiin keskeytyksiin. Lyhyen keskeytyksen kokonaiskesto on alle 36 tuntia ja pitkän keskeytyksen yli 36 tuntia. Tässä työssä käsitellään vain pitkien pakotettujen keskeytyksien merkitystä, koska kaapeliviat aiheuttavat aina pitkän pakotetun keskeytyksen. [1] Tasasähköyhteyksien pitkät pakotetut keskeytykset rajoittavat voimajärjestelmän siirtokykyä, aiheuttaen yleensä pitkäaikaisen pullonkaulatilanteen sähkömarkkinoille. Pullonkaulalla tarkoitetaan tilannetta, jossa sähkön siirtokapasiteetti on siirtotarvetta pienempi. Pullonkaula synnyttää alueiden välille hintaeroja, jolloin ylitarjonta-alueella sähkön hinta laskee ja alitarjonta-alueella nousee. Jos siirtotarve olisi rajasiirtokapasiteettia suurempi Ruotsista Suomeen, sähkön hinta nousisi Suomessa. [23]

Pitkät keskeytykset aiheuttavat kustannuksia, jotka riippuvat hyvin vahvasti sähkömarkkinatilanteesta. Sähkönkulutus ja -tuotanto vaihtelevat sääolosuhteiden, vuodenajan, viikonpäivän ja vuorokauden ajan mukaan. Tämän vuoksi pitkän pakotetun keskeytyksen aiheuttamia kustannuksia on hyvin vaikea arvioida ennakkoon, mutta pahimmassa tapauksessa pitkä keskeytys voi aiheuttaa suuret kustannukset. Pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden vuonna 2018 julkaisemassa tasasähköyhteyksien luotettavuus ja käytettävyys -selvityksessä [1] yhden tasasähköyhteyden keskeytysten aiheuttamiksi kustannuksiksi on arvioitu noin 30 M€ vuodessa. Lisäksi Pohjoismaisten HVDC-yhteyksien siirtokapasiteetti-

tin on arvioitu kaksinkertaistuvan vuoteen 2025 mennessä, jolloin myös keskeytyskustannusten on arvioitu kaksinkertaistuvan. Selvitys perustuu Pohjoismaisten tasasähköyhteyksien keskeytysvikatilastoihin vuosilta 2012-2015 [22]. Keskeytysten aiheuttamat kustannukset on laskettu pohjoismaisten tasasähköyhteyksien siirtokapasiteettien keskiarvosta, vuosittain keskeytyksiin kuluneesta ajasta sekä keskeytyksen aiheuttamasta tuntikeskiarvokustannuksesta. Pohjoismaisten HVDC-yhteyksien keskeytystilastojen mukaan pitkien pakotettujen keskeytysten kokonaismäärä oli noin 222 päivää vuodessa Pohjoismaisilla HVDC-yhteyksillä, josta kaapelivikojen osuus oli noin 50 %. [1]

## 2.4 Fingridin tasasähköyhteyksien kaapelit

Tässä työssä käsiteltävillä tasasähköyhteyksillä on viittä rakenteeltaan erilaista kaapelia. Tasasähköyhteyksille ei ole olemassa standardoitua kaapelia johtuen siirtoyhteyksien erilaisista asennusolosuhteista ja yhteyksien eri mitoituksista [24]. Kaapeleiden rakenne ja asennustavat ovat tärkeää ymmärtää, koska erilaiset rakenteet ja asennustavat vaikuttavat erilaisesti käytettäviin vianpaikannusmenetelmiin ja niiden soveltamiseen [25].

### 2.4.1 Tasasähkökaapelin rakenne yleisesti

Kaapeleiden rakenteet eroavat toisistaan, mutta pääpiirteissään tasasähkökaapelin rakenne muodostuu johtimesta, johdinsuojasta, johdineristyksestä, hohtosuojasta ja ulkoisista suojakerroksista. Johtimen tarkoituksena on kuljettaa kaapelissa kulkeva virta ja materiaalina käytetään yleensä kuparia tai alumiinia. Alumiinin resistiivisyys on kuparia isompi, minkä vuoksi alumiinijohtimella tulee olla suurempi poikkipinta-ala saman tehon siirtämiseen. Puolijohtavasta materiaalista tehdyn johdinsuojan tarkoituksena on tasoittaa johtimen pinnan epätasaisuuksien aiheuttamia kentänvoimakkuuksien huippuja ja siten parantaa kaapelin eristysrakenteen jännitekestoisuutta. [8, 24] Liian suuret kentänvoimakkuudet voivat aiheuttaa läpilyönnin, jolloin eristeen yli oleva jännite romahtaa, virta eristeen läpi kasvaa suureksi ja eriste menettää eristysominaisuutensa [17].

Kaapelin eristys määrää kaapelin jännitekestoisuuden ja johtaa johtimessa syntyneen lämmön uloimpiin kerroksiin [8]. Tasasähköyhteydellä käytettävän kaapelin eristysmateriaalina käytetään yleisesti öljypaperia tai muovia [24]. Öljypaperieristeessä öljyn tehtävä on täyttää paperinauhojen huokokset ja välit vähentäen eristeessä tapahtuvia osittaispurkauksia sekä parantaa kaapelin taivutusominaisuuksia. Eristeen jännitelujuus on korkeampi lämpimällä kaapelilla, koska kyllästeseos lämpölaajenee täyttäen mahdolliset tyhjiöt eristeessä. Muovieristeellä on monia etuja verrattuna öljypaperieristeeseen [27]. Muovieristeinen kaapeli kestää korkeampia lämpötiloja ja on yleisesti kevyempi kuin öljypaperieristeinen kaapeli. Lisäksi sen käsittely ja korjaaminen on yksinkertaisempaa ja nopeampaa

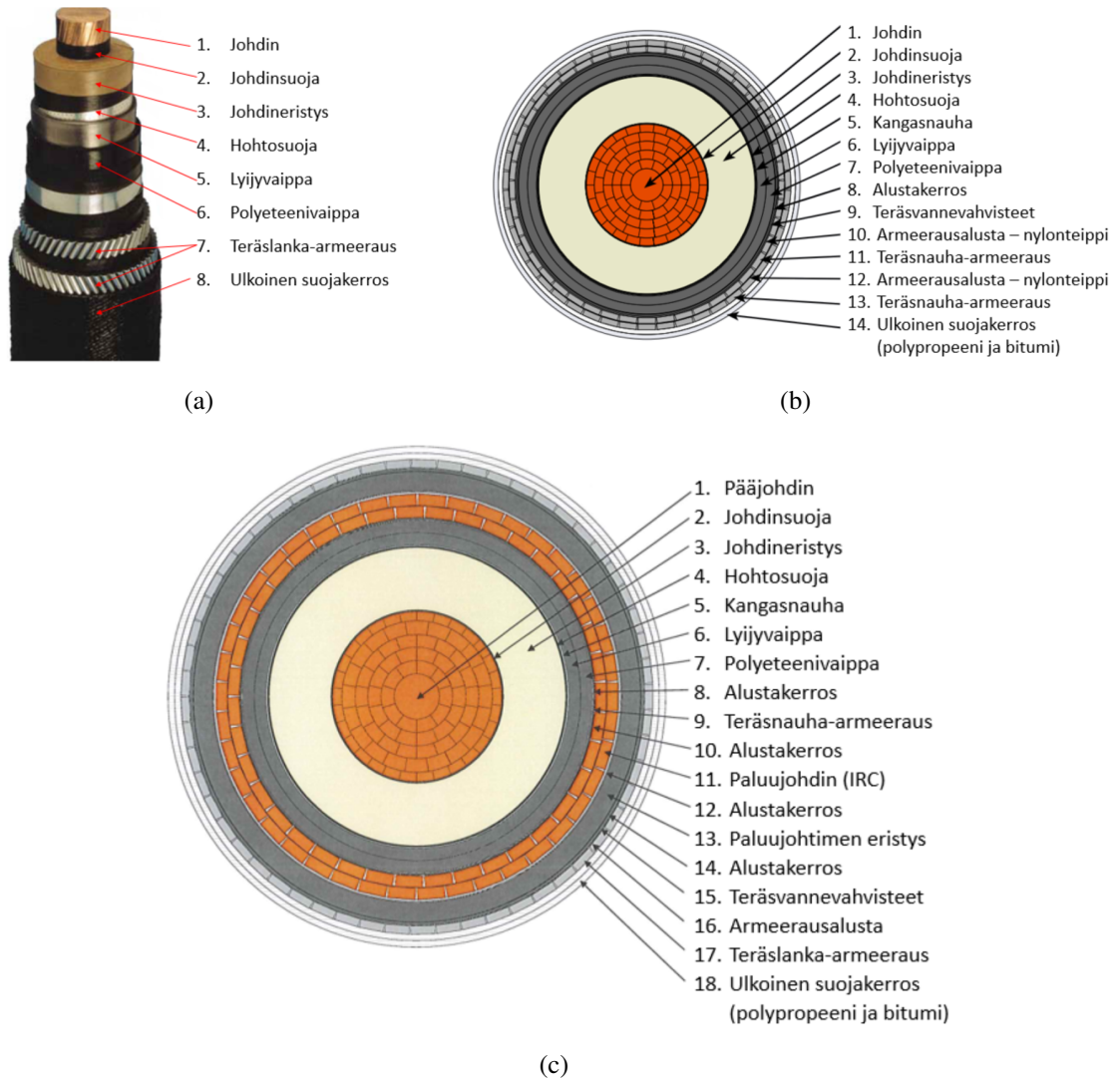
kuin öljypaperieristeisellä kaapelilla. Muovieristeen haittana on kuitenkin eristeeseen ker-tyneiden varausten hidas relaxoituminen, mikä ikäännyttää eristettä tai aiheuttaa mahdol-lisen vaurioriskin kaapelin eristeessä. Hohtosuojan tarkoituksena on yhdessä johdinsuojan kanssa rajata johtimen aiheuttama sähkökenttä kaapelin sisään ja tasoittaa kosketussuojan pinnan epätasaisuuksien aiheuttamia kentänvoimakkuuksien huippuja [9].

Kaapelin uloimpiin kerroksiin kuuluvat vaippa, armeeraus ja ulkoinen suojakerros. Vai-pan tarkoituksena on estää kosteuden tunkeutuminen kaapelin eristekerrokseen. Vaipan materiaalina käytetään yleisesti metallia kuten lyijyä, alumiinia tai kuparia, mutta myös muovia kuten polyeteeniä käytetään vaippamateriaalina [24]. Maa- ja merikaapeleiden vaipat poikkeavat toisistaan yleisesti. Merikaapelin vaippa on yleisesti toteutettu yhtenäisellä lyijyvaipalla, jonka jälkeen on välittömästi polyeteenivaippa. Maakaapeleiden me-tallinen vaippa on tyypillisesti tehty metallinauhoista tai -laminaateista. [9] Kaapelin ar-meeraus muodostaa mekaanisen tuen kaapelin sisimmille kerroksille ja suojaa kaapelia ulkoisilta vahingoilta. [9, 24] Kaksoisarmeeraus on pakollinen syviin vesiin asennettavis-sa kaapeleissa, koska kaapelin asennuksessa ja viankorjauksessa aiheutuu suuria vetovoi-mia kaapeliin. Lisäksi kaksoisarmeeraus muodostaa paremman mekaanisen suojan ulkoi-sia iskuja vastaan kuin yksi armeerauskerros. Kaapelin uloin kerros tehdään yleisimmin muovista ja sen tehtävänä on muodostaa korroosiosuoja kaapelin armeeraukselle. [8, 26]

## 2.4.2 Fingridin tasasähkökaapeleiden rakenne

Fingridin kaapelit ovat joko MIND-kaapeleita (MIND, Mass Impregnated Non-Draining) eli öljypaperieristeisiä massakaapeleita tai muovieristekaapeleita. Kuvassa 2.3 on esitetty poikkipintaleikkaukset Fenno-Skan 1, Fenno-Skan 2 ja EstLink 2 -merikaapeleista, jot-ka kaikki ovat MIND-kaapeleita. MIND-kaapeleiden käyttäminen HVDC-yhteyksillä on ollut yleisempää kuin muovieristeisten kaapeleiden, mutta kilometrimääräisesti muovie-risteisiä kaapeleita käytetään nykyään jopa enemmän kuin MIND-kaapeleita. [27] Muovi-kaapeleiden eristeet ovat kehittyneet viime vuosien aikana ja esimerkiksi ABB on ilmoit-tanut kehittäneensä uuden muovieristeisen 525 kV HVDC-kaapelin, jolla voidaan siirtää jopa 50 % enemmän tehoa kuin ABB:n 320 kV muovieristeisellä kaapelilla [28].





**Kuva 2.3.** Fingridin HVDC-yhteyksien MIND-kaapelirakenteet a) Fenno-Skan 1 b) Fenno-Skan 2 c) Estlink 2, muokattu lähteistä [19, 29, 30].

Fenno-Skan 1 ja 2 -merikaapelit ovat rakenteeltaan hyvin samanlaisia MIND-kaapeleita. kaapeleiden suurimmat erot ovat mitoituksessa, jonka huomaisi kaapelin rakennesosien eri paksuuksista. kaapeleiden johtimet on valmistettu kuparista ja vettä eristävänä vaippamateriaalina on käytetty lyijyä. Fenno-Skan 2:n lyijyvaipan päällä on puolijohtava polyeteenivaippa, joka toimii lyijyvaipan korroosio- ja mekaanisena suojana sekä estää lyijyvaipan kulumista. Puolijohtava polyeteenivaippa estää myös haitallisten potentiaalierojen syntymisen lyijyvaipan ja armeerauksen välillä [24]. Jos muovivaippa ei ole puolijohtava, lyijyvaipan ja armeerauksen potentiaalieron taseus tulee tehdä maadoituslankojen avulla. Fenno-Skan 1 -kaapelissa lyijyvaipan ja armeerauksen välinen potentiaalieron taseus on toteutettu tällä tavalla, koska muovivaippa ei ole puolijohtava. Kaapeleiden armeeraus on toteutettu teräslangoilla, jotka on kierretty vastakkaisiin suuntiin eri kerroksissa. Kaapeleiden ulkoinen suojakerros muodostaa korroosiosuojan armeeraukselle kuitenkin päästäten vettä armeeraukseen, jonka kautta lyijyvaippa lopulta maadoittuu mereen. [19, 29]

Fenno-Skan 1 -kaapeli on asennettaessa laskettu merenpohjan päälle eikä haudattu merenpohjaan, kun taas Fenno-Skan 2 -merikaapeli on asennuksen yhteydessä Suomen puolelta haudattu pehmeisiin kohtiin noin metrin syvyyteen merenpohjaan. Fenno-Skan 1 on alttiimpi kolmannen osapuolen vahingoille, koska sitä ei ole haudattu merenpohjaan [31]. Merenpohjan syvyys vaihtelee Fenno-Skan 1 -kaapelireitillä noin 0–110 metrin välillä ja Fenno-Skan 2 -kaapelireitillä noin 0–100 metrin välillä merenpinnasta. Rihtniemessä molemmat kaapelit on suojattu raudoitetuilla betonilaatoilla satoja metrejä rannalta merelle. [7, 34]

EstLink 2 -merikaapeli on Fenno-Skan -kaapeleiden tavoin MIND-kaapeli, mutta sen rakenne on oleellisesti erilainen verrattuna Fenno-Skan -kaapeleihin kaapeliin integroidun paluujohdinten vuoksi, kuten kuvasta 2.3 voidaan huomata. Fenno-Skan-yhteyksien erovirta kulkee maaperässä ja merenpohjassa, mutta EstLink 2:n paluuvirta kulkee integroidussa paluujohdintessa. Tällöin puhutaan koaksiaalikaapelista, jolloin samassa kaapelissa kulkee pää- ja paluuvirta. Paluujohdin on mitoitettu huomattavasti pienemmälle jännitteelle kuin pääjohdin, jolloin myös paluujohdinten eristyksen tarve on pienempi. [32] Koaksiaalikaapelin rakenteella on huomattava vaikutus kaapelista syntyneeseen ulkoiseen magneettikenttään, jota käsitellään tarkemmin luvussa 5 [24].

EstLink 2 -pää- ja paluupiirin johtimien materiaalina on kuparia. Pääjohtimen eristemateriaalina on käytetty öljypaperia ja paluujohdinten eristeenä on käytetty ristosilloitettua polyeteeniä (XLPE, Extruded Cross-Linked Polyethylene). Kaapeli on vahvistettu kahdella ohuella teräsnauha-armeerauskerroksella ennen paluujohdinta ja yhdellä paksummalla teräslanka-armeerauskerroksella ennen ulkoista suojakerrosta. [32] Kaapeli on haudattu suurimmilta osin noin metrin syvyyteen merenpohjaan kaapelireitillä, jossa meren syvyys vaihtelee 0–85 metrin välillä [7].

EstLink 1 -maa- ja merikaapeli ovat molemmat muovieristeisiä kaapeleita. Kuvassa 2.4 on esitetty molempien kaapeleiden rakenteet. Merikaapelin johtimien materiaalina on käytetty kuparia, mutta maakaapelissa on käytetty johdinmateriaalina alumiinia. Kaapeleiden eristyksessä käytetty muovi on ristosilloitettua polyeteeniä [24]. Merikaapelin vaippa on tehty lyijystä, jonka päällä on polyteenivaippa Fenno-Skan -kaapeleiden ja EstLink 2 -kaapelin tavoin. Maakaapelin vaippa on toteutettu kuparijohtimien, puolijohtavan muovinauhan ja alumiinilaminaatin yhdistelmänä. Konsentrista kuparijohdinta käytetään varaus- ja vikavirtojen kulkutienä [8]. Kuparijohtimien päällä on paisuva puolijohtava muovinauha, joka muodostaa kaapelin pitkittäisen kosteussuojan, kun taas ulkoisen suojakerroksen sisäpintaan kiinnitetty alumiinilaminaatti muodostaa poikittaisen kosteussuojan kaapelilla [33]. Merikaapelin armeeraus on toteutettu yhdellä teräslankakerroksella, jonka vuoksi kaapelia on helpompi käsitellä esimerkiksi viankorjauksen yhteydessä. [16]



**Kuva 2.4.** Estlink 1 -kaapelirakenteet a) merikaapeli b) maakaapeli, muokattu lähteistä [16, 33].

EstLink 1 -yhteyden merikaapelit on niputettu yhteen ja haudattu merenpohjaan noin metrin syvyyteen, jonka lisäksi kaapelireitin merenpohjan syvyys vaihtelee noin 0–100 metrin välillä. Maakaapelit on asennettu noin 60–70 cm syvyyteen maanpinnasta, mutta tienlyityksissä ja muissa risteämäkohdissa syvyys saattaa olla jopa 2,5 metriä. Maakaapeleiden välinen etäisyys toisistaan on noin 10–20 cm kaapelin kehältä toisen kaapelin kehään. Maakaapelit on asennettu suuntaporauksella kohteissa, joissa kaivaminen on ollut hyvin hankalaa tai kallista. Suuntaporausputket on täytetty bentoniittisavella, joka johtaa tehokkaasti kaapelissa syntyneen lämmön pois. [16, 34]

## 2.5 Tasasähköyhteyksien kaapeliviat

Tasasähköyhteyden kaapelivialla tarkoitetaan tilannetta, jolloin kaapelissa on pysyvä vaurio, minkä vuoksi tasasähköyhteyttä ei voida käyttää [35]. Kaapelivian aiheuttaneet syyt voidaan jakaa sisäisiin, ulkoisiin ja tuntemattomiin. Sisäisellä vialla tarkoitetaan kaapelissa olevaa epäkohtaa, joka johtaa vikaan kaapelin käytön aikana [31]. Sisäisen vian voivat aiheuttaa valmistusvirheet, materiaalivirheet ja kaapelin asennuksessa tapahtuneet virheet. Valmistusvirheisiin vaikuttavat kaapelin suunnittelu, käytetyt materiaalit ja valmistusprosessi. Kaapelin asennuksessa aiheutuneet mekaaniset rasitukset voivat johtaa sisäisen vian syntyyn. Sisäisestä syystä aiheutuneet virheet saattavat ajan myötä päästää esimerkiksi kosteutta kaapeliin tai aiheuttaa osittaispurkauksia ja lopulta aiheuttaa läpilyönin kaapelin eristeessä. Sisäisen vian syntyä nopeuttaa esimerkiksi kaapelin ylikuormitus ja korroosio. [3]

Kaapelivika voi aiheutua myös ulkoisesta syystä, jolloin mikä tahansa kaapelin ulkopuolinen tekijä aiheuttaa vian. Ulkoisia syitä ovat esimerkiksi kolmannen osapuolten aiheuttamat mekaaniset iskut kaapeliin, lämpeneminen esimerkiksi kaapelin vajoamisen tai hautausvyödyden muuttumisen seurauksena. Ulkoinen syy voi myös olla jokin muu fyysinen tekijä, joka johtaa kaapelin vikaantumiseen. Ulkoiset kolmannen osapuolen aiheuttamat viat ovat yleisin syy maa- ja merikaapeleiden vikaantumiselle [2, 31]. Kaapelivika voi johtua myös tuntemattomasta syystä, jolloin vian alkuperäistä syytä ei ole varmasti saatu selvitettyä. [31]

Tasasähköyhteyden kaapelin vikaantumisella on kriittinen vaikutus sähkönsiirtojärjestelmään. Toisin kuin avojohdoilla, kaapeliviat ovat yleensä pysyviä vikoja ja etenkin merikaapeleilla vian kokonaiskesto on yleensä pitkä. [36] Tasasähköyhteyksillä ei ole korvaavia rinnakkaisia yhteyksiä, jolloin kaapelivika aiheuttaa aina siirtokapasiteetin menetyksen [2]. Taulukkoon 2.3 on listattu kaikki Fingridin tasasähköyhteyksien kaapeliviat, niiden kokonaiskestot, vikakohteet ja vikojen syyt. Taulukossa 2.3 ei ole huomioitu yhteyksillä tapahtuneita kaapelipäätevikoja. Kokonaiskestolla tarkoitetaan aikaa, joka kuluu vian havaitsemisesta yhteyden takaisin käyttöön kytkemiseen.

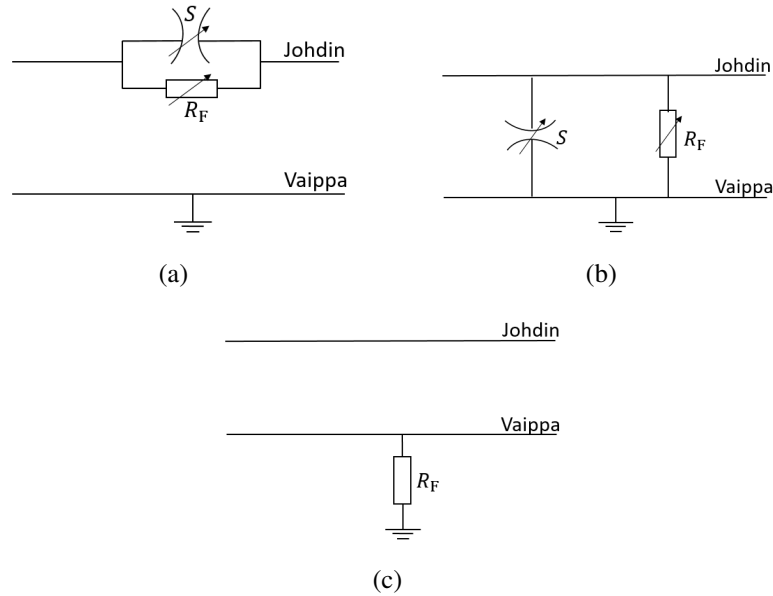
**Taulukko 2.3.** Fingridin tasasähköyhteyksien kaapeliviat vuosilta 1990-2018 [37].

Kaapeli	Vuosi	Kokonaiskesto	Vika	Vian syy
Fenno-Skan 1	1991	47 d	kaapelivaurio	ulkoinen
Fenno-Skan 1	2003	71 d	eristeen heikentyminen	ulkoinen
Fenno-Skan 1	2005	87 d	kosteus eristeessä	tuntematon
Fenno-Skan 1	2006-2007	70 d	kosteus eristeessä	tuntematon
Fenno-Skan 2	2012	68 d	kaapelivaurio	ulkoinen
Fenno-Skan 1	2013	58 d	eristeen heikentyminen	sisäinen
Estlink 2 paluu maa	2014	9 d	kaapelijatkos	sisäinen
Estlink 2 paluu maa	2014	5 d	kaapelijatkos	sisäinen
Estlink 1 maa	2016	12 h	kaapelivaipan vaurioituminen	ulkoinen

Merikaapeleiden todennäköisyys vikaantua ainakin kerran elinkaarensa aikana on hyvin suuri [36]. Taulukosta 2.3 voidaan huomata, että kaapelit eivät vikaannu usein. Merikaapeleiden vikojen kokonaiskestot ovat kuitenkin aina pitkiä, mistä esimerkkinä on Fenno-Skan 1 -kaapelivika vuodelta 2005, jolloin yhteys oli lähes kolme kuukautta poissa käytöstä. Merikaapelilla vian kokonaiskesto on huomattavasti pidempi kuin maakaapelilla johtuen haasteellisista vianpaikannus- ja -korjausolosuhteista [2]. Taulukosta 2.3 voidaan edelleen huomata, että vian aiheuttajat ovat vaihdelleet. Tuntemattomien syiden kohdalla ei voida varmuudella todeta vian alkuperäistä syytä.

Kaapelivika voi olla tyypiltään sarjavika, rinnakkaisvika tai vaippavika, joiden sijaiskytkennät on esitetty Kuvassa 2.5. Sarja- ja rinnakkaisvika voidaan ajatella kipinävälin ja epälineaarisen vastuksen rinnankytkentänä, jossa epälineaarinen vastus  $R_F$  kuvaa kaape-

lin vikaresistanssia ja kipinäväli  $S$  kaapelin eristeeseen kehittynyttä läpilyöntikanavaa. HVDC-kaapelin vaippaviassa lyijyvaippaan pääsee kosteutta ulkoisen suojakerroksen rikkoutumisen vuoksi [25]. Kaapeliviati voidaan edelleen jakaa pieni- tai suuriresistanssisiin vikoihin riippuen vikaresistanssin suuruudesta. [38]



**Kuva 2.5.** Kaapelivikojen sijaiskytkennät a) sarjavika b) rinnakkaisvika c) vaippavika, muokattu lähteistä [6, 25].

Sarjavialla tarkoitetaan virran kulkutien osittaista tai kokonaista estymistä. Jos kaapelin johdin ei ole poikki, on kyseessä pieniresistanssinen vika. Sarjavika on yleensä suuriresistanssinen, jos kaapelin johdin on kokonaan poikki. Sarjavika voi kuitenkin olla pieniresistanssinen, jos johdin on poikki ja pysyy johtavana esimerkiksi valokaaren kautta. Suurjännitteisen kaapelin johtimen katkeaminen on hyvin epätodennäköistä, koska johtimien poikkipinta-alat ovat hyvin suuria, jolloin suuriresistanssiset sarjaviat ovat hyvin harvinaisia. [36, 39] Sarjavika voi ilmetä myös kaapelijatkoksessa, jos kaapelin ja kaapelijatkoksen välinen liitos on huono [6].

Kaapelin rinnakkaisvika aiheutuu johdineristyksen rikkoutumisesta, mikä voidaan jakaa oiko- ja maasulkuun. Oikosulussa kaksi johdinta ovat sähköisesti kontaktissa toisiinsa, josta esimerkkinä on EstLink 2 -pää- ja paluupiirien välinen kontakti. Maasulussa yksi johdin on sähköisesti kosketuksissa maan potentiaaliin tai maahan johtavaan osaan. Rinnakkaisvialla voi olla pieni tai suuri vikaresistanssi. [38, 39] Vikaresistanssi määritetään yleensä pieneksi kun kaapelin aaltoimpedanssi on suurempi kuin vikaresistanssi ja vastaavasti toisinpäin [39]. Aaltoimpedanssi on kaapelin rakenteesta riippuva arvo [9]. Rinnakkaisvika voi olla myös ajoittainen, jolloin kaapelin vikaresistanssi on riippuvainen jännitteestä. Ajoittainen vika käyttäytyy kuten suuriresistanssinen vika, mutta tietyllä jännitetasolla eristeessä tapahtuu läpilyönti muuttaen vikaresistanssin pieniresistanssiseksi. [36, 25]

Kaapelin ulkoiseen suojakerrokseen voi aiheutua vaurio mekaanisen rasituksen tai kolmannen osapuolen vaikutuksesta, jolloin kyseessä on kaapelin vaippavika eli maasulku vaipan ja maaperän välillä. Ulkoisen suojakerroksen rikkoutumisen kautta kaapeliin pääsee kosteutta, joka ajan myötä aiheuttaa korroosiota kaapelin metalliseen vaippaan ja kosteuden pääsyn johdineristykseen. [25, 42] Kaapelin vaipan vika ei välttämättä suoraan aiheuta pakotettua keskeytystä yhteydellä, jos kaapelin pääeristyksessä ei tapahdu läpilyöntiä. Kaapelivika voi esiintyä myös kaapelivarusteissa (kaapelipäätteet ja -jatkokset). [25]

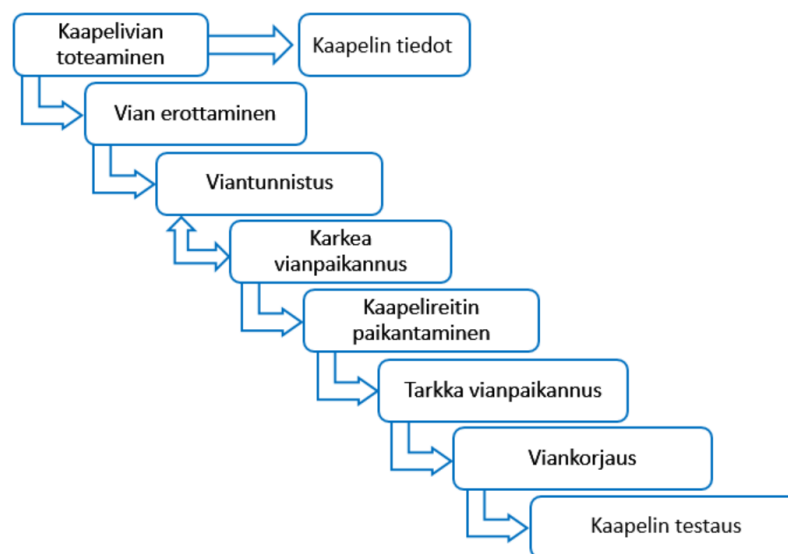
Fingridin kaapeleiden viat ovat käytännössä aina maasulkuja, koska johtimien poikkipinta-alat ovat liian suuret sarjavialle ja vain EstLink 2 -kaapelissa voi tapahtua oikosulku. EstLink 2 -kaapelin oikosulku on hyvin epätodennäköinen, koska paluupiirin johtimen eristystaso on huomattavasti pienempi kuin pääpiirin johtimen. Pääpiirin johdineristyksen rikkoutuminen johtaisi oletettavasti läpilyöntiin myös paluupiirin eristyksessä ja sitä kautta maasulkuun, koska pääpiirin johdineristyksen maksimikentänvoimakkuus on huomattavasti suurempi kuin paluupiirin suurin sallittu kentänvoimakkuus. EstLink 2 -kaapelissa on mahdollista tapahtua pelkkä paluupiiriin maasulku siten että pääpiirin johdineristys säilyisi ehjänä [7, 17].

### 3. SUURJÄNNITTEISEN TASASÄHKÖKAAPELIN VIANPAIKANNUS

Vian nopea ja tarkka paikantaminen on erittäin tärkeää kaapelivian sattuessa [2, 5, 36]. Kaapeliviat ovat yleisesti vaikeita paikantaa etenkin merikaapeleiden tapauksessa, koska merikaapelit ovat usein pitkiä ja sijaitsevat syvällä meressä. Lisäksi merikaapelit ovat usein haudattuina merenpohjaan, mikä vaikeuttaa kaapelin ja vian paikantamista. [2] Tässä luvussa käydään läpi yleisesti vianpaikannuksen prosessi sekä tarkemmin maalla ja merellä suoritettava tarkka vianpaikannus. Luvussa arvioidaan tarkan vianpaikannuksen riskejä ja riskien aiheuttamia vaikutuksia. Lisäksi luvussa käydään läpi esimerkkitapauksia epäonnistuneista HVDC-kaapeleiden vianpaikannuksista.

#### 3.1 Vianpaikannusprosessi

Kaapelin vianpaikannus on prosessi, johon kuuluu vian paikantamisen lisäksi muita osaluokkia. Vianpaikannuksen prosessin vaiheet on esitetty kuvassa 3.1. Vianpaikannuksen prosessin vaiheet ovat samat maa- ja merikaapeleille, mutta niiden soveltaminen erilaista. [36]



**Kuva 3.1.** Kaapelin vianpaikannuksen prosessin eteneminen kaapelivian toteamisesta korjaukseen ja testaukseen, perustuu lähteisiin [2, 25].

Vianpaikannuksen prosessi alkaa tasasähköyhteyden automaatiojärjestelmästä saadusta vikailmoituksesta [36]. Vikailmoituksen jälkeen voidaan tehdä avoimen johdon jänniteko (OLT, Open Line Test) tai jokin muu jänniteko, jossa voidaan erotella yhteyden ehjät osat vikaantuneista. Jänniteko voidaan suorittaa esimerkiksi kestokokeena, jolloin yhteyden tiettyyn osaan syötetään jännitettä tietyn aikaa [17]. Näin testaamalla vika pystytään rajaamaan osaan, jossa tapahtuu yli- tai läpilyönti. Jännitekokeella pystytään yhteydestä riippuen selvittämään onko vika asemalla, avojohto-osuudella tai kaapelissa. Jollain yhteyksillä on myös mahdollista selvittää onko vika tietyllä kaapeliosuudella. [7]

Kaapelivian toteamisen jälkeen työkohteen jännitteettömyys on varmistettava sähkötyöturvallisuus standardin SFS 6002 mukaisesti ennen karkean vianpaikannuksen aloittamista. SFS 6002 määrittelee viisi toimenpidettä, joilla varmistetaan työkohteen jännitteettömyys [40]. Tasasähköyhteyden molemmista päistä aukaistaan erottimet, joiden tehtävänä on varmistaa turvallinen erotus muusta verkosta [9]. Jännitteen uudelleenkytkentä tulee estää lukitsemalla erottimien kytkinlaitteet [40]. Tasasähköyhteys tulee varmistaa jännitteettömäksi molemmista päistä kytkemällä maadoituskytkimet kiinni, minkä tarkoituksena on estää vaaralliset vikavirrat ja indusoituneet jännitteet. Työmaadoituksessa kaikki johtavat osat maadoitetaan ja oikosuljetaan. Lisäksi voidaan tehdä lisätyömaadoitus, joilla varmistetaan turvallisuus esimerkiksi kytkinlaitteiden virheellisen toiminnan tapauksissa. Kaapelia voidaan pitää sylinterimäisenä kondensaattorina, koska johtimen ja vaipan välillä on eristekerros, jolloin kaapeliin jäänyt varaus tulee purkaa siihen sopivalla menetelmällä [17]. Turvallisella ja suunnitellulla vian erottamisella pienennetään mahdollisia turvallisuusriskejä. [40]

Vian erottamisen ja kaapelin jännitteettömyyden toteamisen jälkeen voidaan suorittaa mittauksia vian tunnistamista varten. Vianpaikannuksen prosessissa vian tunnistaminen ja karkea vianpaikannus tukevat toinen toisiaan. Vian tunnistamisella tarkoitetaan kaapelin vikatyypin määrittämistä, jonka avulla pystytään valitsemaan sopivin vianpaikannusmenetelmä. Karkean vianpaikannuksen tarkoitus on rajata vika tietylle alueelle, mutta sen avulla saadaan usein myös määritettyä vikatyypin. [25, 36] Kaapeliviat ovat aina erilaisia, minkä vuoksi karkeaan vianpaikannukseen ei ole yleisohjetta. Tämän vuoksi karkeassa vianpaikannuksessa voidaan joutua käyttämään useita eri menetelmiä [36]. Karkea vianpaikannus voidaan suorittaa asemalta, kaapelipäiteasemalta tai etänä, jolloin karkean vianpaikannuksen aikana ei ole tarvetta lähteä kulkemaan kaapelireittiä pitkin [41].

Karkea vianpaikannus on hyvä suorittaa tasasähköyhteyden molemmista päistä, koska kahdella mittauksella saadaan tarkempi ja luotettavampi paikannustulos. Vain toisesta päästä suoritettu paikannus voi johtaa paikannustuloksen väärään tulkitsemiseen, huonoon tarkkuuteen tai mahdollisesti vikaa ei havaita. Edellä mainitut asiat voi johtua vikatyypistä, vian sijainnista, lähtötietojen epätarkkuudesta, vianpaikannusmenetelmästä, vianpaikannustuloksen väärästä tulkitsemisestä, mittalaitteen tarkkuudesta tai näiden yh-



distelmistä. Käytännössä yhteydellä voi olla myös useampia kaapelivikoja yhtä aikaa, jolloin paikannuspaikasta katsottuna kauempana sijaitseva vika ei välttämättä näy karkeassa vianpaikannuksessa saadussa tuloksessa [7]. Edellä mainittujen asioiden vuoksi karkea vianpaikannus tulisi suorittaa yhteyden molemmista päistä, jolla varmistetaan löydetyn vian tai vikojen sijainti ja todellisuus [41]. Viantunnistuksessa ja karkeassa vianpaikannuksessa on tärkeää tietää mahdollisimman tarkasti kaapeliin liittyviä tietoja. Näitä ovat esimerkiksi rakenne, eristysmateriaali, kokonaispituus, kaapelireitti, asennustapa, mahdolliset aiemmat viat ja kaapelijatkosten sijainti. [6, 38]

Tarkka vianpaikannus suoritetaan alueella, johon vika on karkealla menetelmällä paikannettu [24, 25]. Kaapelin reitti on paikannettava ennen tarkkaa vianpaikannusta, jos kaapelireitin koordinaateista ei ole varmuutta [6, 42]. Kaapelin omistajalla on kuitenkin yleensä riittävän tarkat kaapelikoordinaatit, jolloin itse kaapelin paikantamista ei tarvitse suorittaa. Fenno-Skan 1 ja EstLink 1 -merikaapeleiden kaapelikoordinaateista ei ole tarkkoja tietoja koko matkalta [7], mikä tulee huomioida tarkkaa vianpaikannusta suorittaessa. Tarkka vianpaikannus on suoritettava yleensä lähellä kaapelia, jolloin esimerkiksi 10 metrin epätarkkuus kaapelikoordinaateissa voi pitkittää huomattavasti vianpaikannusta, kun käytetään magneettikentän mittaukseen perustuvaa menetelmää [43]. Kaapelireitiltä voidaan suorittaa vian tarkka paikannus, millä pyritään selvittämään vian täsmällinen sijainti [24, 25]. Tarkkaa vianpaikannusta maalla ja merellä käsitellään tarkemmin kappeleissa 3.2 ja 3.3 sekä erilaisia tarkkoja vianpaikannusmenetelmiä käsitellään luvussa 4.

Kaapelin korjaaminen on prosessin seuraava vaihe, mikä voi olla haasteellinen riippuen vian sijainnista ja sääolosuhteista [2, 24]. Kaapeli katkaistaan niin, että vioittunut osa kaapelista saadaan pois, jonka tilalle laitetaan varakaapelia [41]. Korjauksessa kaapeliin syntyy kaksi uutta jatkosta, jotka vaikuttavat joidenkin vianpaikannusmenetelmien tarkkuuteen, koska kaapelin aaltoimpedanssi muuttuu jatkoskohdassa [26]. Korjauksessa voidaan selvittää yhdellä jatkoksella, jos vika on lähellä kaapelipäätettä [41]. Kaapelin korjaaminen on yleensä vianpaikannusprosessin aikaa vievin vaihe, jolloin mahdollisimman tarkalla vianpaikannuksella voidaan vaikuttaa vian korjaamisen kokonaiskestoon [2].

Maalla ja merellä suoritettava viankorjaus poikkeavat toisistaan merkittävästi. Maalla vian korjaaminen on huomattavasti helpompaa ja nopeampaa, koska vikakohtaan päästään helpommin käsiksi. Merellä suoritettava korjaus vaatii siihen sopivan aluksen, miehistön ja kaapelin varaosat. Vian löytämisen jälkeen kaapeli on katkaistava joko sukeltajan tai ROV:n toimesta. ROV on vedenalainen kauko-ohjattu ajoneuvo, jota voidaan käyttää myös kaapelin paikantamisessa ja tarkassa vianpaikannuksessa. [2, 41] Muovikaapelin korjaukseen on nykyisin menetelmiä, joilla sukeltajat voivat korjata vian merenpohjassa [44]. Muovikaapelin vikakohtaan ympärille luodaan kuiva ympäristö eräänlaisen kapselin sisään, jolloin minimoidaan myös varakaapelin tarve. Tämän menetelmän käyttämistä rajoittaa maksimisyvyys, jossa sukeltajat voivat työskennellä. Kaapelin korjauksen jäl-

keen on testattava kaapelin toimintakyky esimerkiksi avoimen johdon jännitekokeella tai muulla vastaavalla kestoajännitekokeella [2].

Fingridin vianpaikannusprosessissa ei ole tällä hetkellä mitään erillistä viantunnistusmenetelmää, jolla saataisiin määritettyä kaapelivian tyyppi. Lisäksi erilaisia karkeita vianpaikannusmenetelmiä on vähän käytössä. HVDC-yhteyden vikatilanteessa varmistetaan, että kyseessä on kaapelivika, minkä jälkeen suoritetaan karkea vianpaikannus. [7] Tällä toimintatavalla ei välttämättä saada selvitettyä vikatyyppejä, paikannettua vikaa tai karkeassa vianpaikannuksessa saavutetaan huono tarkkuus. Esimerkiksi Ranskan kantaverkkoyhtiö RTE:llä (RTE, Réseau de Transport d'Électricité) on käytössä eristysvastusmittaus, jolla pystytään määrittämään kaapelin vikatyypin [4]. Lisäksi RTE:llä on käytössä monia eri karkeita vianpaikannusmenetelmiä, joilla parannetaan karkean vianpaikannuksen tehokkuutta. Luvussa 4 käsitellään vianpaikannusmenetelmiä myös tästä näkökulmasta.

### **3.2 Tarkka vianpaikannus maalla**

Tarkka vianpaikannus maalla on riippuvainen kaapelivian tyypistä, kaapelivian sijainnista ja kaapelin asennustavasta kyseisessä sijainnissa. Maakaapelit ovat sijainnista riippuen usein suoraan maahan haudattuja tai putkeen asennettuja, jolloin kaapeli ei ole visuaalisesti näkyvissä. Lisäksi kaapelin haudaussyvyys voi vaihdella kaapelireitin varrella. Putkeen asennetuissa kaapeleissa jotkut tarkat vianpaikannusmenetelmät eivät anna tarkkaa tulosta, koska kaapeli ei ole suoraan kosketuksissa maaperään. [45]

Maalla kaapelireitillä olevat merkinnät suurjännitteisestä kaapelista helpottavat kaapelireitin paikantamista ja siten tarkkaa vianpaikannusta. Merkinnät helpottavat tarkkaa vianpaikannusta, koska vianpaikantaja pystyy arvioimaan paremmin kaapelin sijainnin ja kulkemaan parhaimmillaan kohtisuoraan kaapelin yläpuolella, jolloin paikannustulos on yleensä parhain. Maakaapelireitillä voi olla hankalia esteitä kuten rautatie, ajotiet ja joet, joissa asennus usein tehdään suuntaorauksena. Vianpaikannuksen näkökulmasta näillä alueilla sijaitsevat kaapeliviat voivat olla hankalia paikantaa, koska kaapelin haudaussyvyys on isompi. Lisäksi ajotiellä ja rautatiellä on yleensä muuta liikennettä. Maakaapelireitillä voi olla myös alueita, joissa vianpaikannukseen tulee olla lupa alueen omistajalta. Tämän vuoksi tarkan vianpaikannuksen suorittaminen voi viivästyä. [45]

### **3.3 Tarkka vianpaikannus merellä**

Merikaapeleiden tarkka vianpaikannus on haastavaa siitä huolimatta, että vian paikantamiseen löytyy monia eri menetelmiä [36]. Toisin kuin karkea vianpaikannus, tarkka vianpaikannus on vielä hyvin vähän tutkittu alue. Lisäksi yksittäiset tarkat vianpaikannusmenetelmät eivät ole vakiinnuttaneet samanlaista asemaa merikaapelin vianpaikannuksessa

kuin esimerkiksi TDR-mittaus karkeassa vianpaikannuksessa. [35] Uusia ja jo olemassa olevia tarkkoja vianpaikannusmenetelmiä kehitetään kuitenkin koko ajan ja esimerkiksi optiseen kuituun perustuvilla menetelmillä arvioidaan olevan merkittävä tulevaisuus tarkassa vianpaikannuksessa [44].

Merikaapeleiden tarkka vianpaikannus poikkeaa maakaapeleista, koska vikaa joudutaan etsimään merellä. Tällöin samaan tekniikkaan perustuvia tarkkoja vianpaikannusmenetelmiä joudutaan soveltamaan eri tavalla maalla ja merellä. Lisäksi merellä tarkan vianpaikannusmenetelmän soveltaminen riippuu hyvin paljon vian sijainnista, koska meren syvyys kaapelireitillä voi vaihdella huomattavasti. [2]

Merellä suoritettava tarkka vianpaikannus voidaan suorittaa meressä lähellä kaapelia tai vedenpinnan yläpuolelta riippuen käytettävästä menetelmästä. Matalissa vesissä vianpaikannus voidaan tehdä sukeltajan avulla, mutta syvemmillä alueilla vianpaikannus tehdään ROV:n avulla. Jos kaapelia ei ole haudattu merenpohjaan, yhtenä tarkkana vianpaikannusmenetelmänä on tehdä visuaalinen tarkistus sukeltajan tai ROV:n kameran avulla. [4, 43] Haudatun tai hautautuneen kaapelin vianpaikannus on hankalampaa kuin näkyvässä olevan kaapelin, koska kaapelireittiä ei välttämättä pystytä seuraamaan visuaalisesti [46]. Vedenpinnan yläpuolelta tehtävä vianpaikannus voidaan suorittaa ilman sukeltajaa tai ROV:a. Vedenpinnan yläpuolelta tehtävään tarkkaan vianpaikannukseen on kehitetty vianpaikannuslaitteistoja, joilla mittaus voidaan suorittaa vedenpinnan yläpuolelta parhaimmassa tapauksessa 80–100 metrin syvyyteen. Esimerkiksi RTE on kehittänyt tällaisen vianpaikannuslaitteiston. [4]

### **3.4 Vianpaikannuksen riskit ja riskienhallinta**

Tämä kappale käsittelee vianpaikannukseen liittyvien riskien tunnistamista ja niiden aiheuttamia vaikutuksia sekä niihin varautumista. Vianpaikannuksen riskit jaetaan turvallisuus- ja kustannusriskeihin, jotka aiheuttavat erilaisia kustannuksia. [5, 25]. Lisäksi kappaleessa käydään läpi esimerkkejä vianpaikannuksen epäonnistumisesta.

#### **3.4.1 Riskien tunnistaminen**

Vianpaikannuksen turvallisuusriskit voidaan jakaa työn suorittamisesta aiheutuviin riskeihin ja yleisiin henkilöturvallisuusriskeihin. Vianpaikannuksessa käytetään suurjännitteisiä laitteita, joiden käyttöön liittyy aina sähkötyöturvallisuusriski. Kaapeliin syötettävä suuri jännite ja virta aiheuttavat mahdollisen sähköiskuvaaran kaapelin molempiin päihin sekä vikapaikkaan. Turvallisuus tulee siis huomioida myös kaapelin vastakkaisessa päässä, jotta ehkäistään henkilövahinkojen syntymisen. Lisäksi suuren virran aiheuttama valokaari voi aiheuttaa tulipalon kaapelivian läheisyyteen. Työn suorituksesta aiheutuvia

riskejä ovat myös laiterikot ja muut kuin sähkötyöstä aiheutuvat henkilövahingot. Laiterikko voi aiheuttaa turvallisuusriskin, minkä lisäksi se voi kasvattaa vianpaikannukseen kuluvaa aikaa, jos vianpaikannus suorittaminen viivästyy laiterikon vuoksi. Merellä suoritettavaan vianpaikannukseen liittyy monia eri turvallisuusriskejä, joita ovat esimerkiksi sukellustyö ja meressä sijaitsevat räjähtämättömät ammuksiset. [47]

Vianpaikannuksen viivästyminen on aina kustannusriski, koska aika vaikuttaa suoraan vianpaikannuksesta aiheutuviin suoriin ja epäsuoriin kustannuksiin. Vianpaikannuksen kustannusriskejä ovat kaikki asiat mitkä viivästyttävät yhteyden saamista takaisin sähkömarkkinoiden käyttöön. Myös työturvallisuusriskit aiheuttavat usein kustannusriskin. Kaapelin vianpaikannus voi epäonnistua vikapaikan tulkintavirheestä, epämääräisestä paikannustuloksesta tai muista asioista, jotka johtavat vikapaikan väärään paikantamiseen. Tällöin riskinä on kaapelin katkaiseminen tarpeettoman kaukana vikapaikasta, jos kaapelivikaa ei nähdä ulkoisesti. Lisäksi kaapelissa voi olla enemmän kuin yksi vika, jolloin jokin kaapelivika voi jäädä paikantamatta riippuen käytettävästä vianpaikannusmenetelmästä ja vianpaikannuksen suorittajasta ammattilaisuudesta. Kaikki vianpaikannusmenetelmät eivät sovellu erityyppisen kaapelivikojen ja eri asennustapojen yhteydessä käytettäväksi, jolloin väärää menetelmää käytettäessä vikapaikkaa ei löydetä. Tällöin yhteyden saaminen takaisin käyttöön viivästyy jolloin vianpaikannuksesta aiheutuvat kustannukset kasvavat, koska vianpaikannus joudutaan suorittamaan uudelleen. [25, 47]

Vianpaikannus voi viivästyä, jos vikaa ei löydetä väärän vianpaikannusmenetelmän käyttämisen takia. Karkeat ja tarkat vianpaikannusmenetelmät soveltuvat erilaisesti eri kaapelivikoihin, jolloin on tärkeää ymmärtää menetelmien tarkkuus tietyissä tilanteissa. Karkeassa vianpaikannuksessa tapahtuva virhe vaikuttaa välittömästi myös tarkkaan vianpaikannukseen, koska vikaa lähdetään etsimään karkean vianpaikannuksen rajaamalta alueelta. [35]

Kaapelin vianpaikannus voi viivästyä myös ulkopuolisista syistä. Viivästys voi johtua huonoista sääolosuhteista kuten kovasta tuulesta, jolloin vikaa ei päästä paikantamaan merellä. [41] Lisäksi vianpaikannus voi viivästyä alueilla, joilla edellytetään erillinen lupa vian paikantamiseen [25]. Edellä mainituissa tapauksissa vian paikantamiseen käytettävä aika kasvaa, mikä viivästyttää yhteyden käyttöönottoa.

Vianpaikannus voi aiheuttaa myös lisävahinkoja kaapeliin tai kaapelin lähellä oleviin muihin kaapeleihin. Jos vianpaikannuksessa kaapeliin syötetään liian suuri jännite ja virta, tai käytetään kaapelityypille vääränlaista koestustapaa, se voi kehittää kaapelissa jo valmiiksi ollut vian alkua aiheuttaen uuden vian kaapeliin. Lisäksi liian suuri jännite voi indusoitua muihin lähellä oleviin ehjiin kaapeleihin aiheuttaen vahinkoja. [4, 25]

### 3.4.2 Riskien vaikutukset ja hallinta

Vianpaikannuksen kustannusriskit jaetaan suoriin ja epäsuoriin kustannuksiin. Suorat kustannukset muodostuvat kaapelin vianpaikannuksesta aiheutuviin kuluihin ja käytettäviin varaosiin kohdistuvista kustannuksista. Epäsuorat kustannukset muodostuvat vian aiheuttamista vastakaupoista ja kansantaloudellisista haitoista. Suoria ja epäsuoria kustannuksia voivat aiheuttaa esimerkiksi vianpaikannuksen epäonnistuminen, viivästyminen ja henkilövahingot. Henkilövahingot aiheuttavat suoria kustannuksia ja epäsuoria kustannuksia, koska vianpaikannus voi viivästyä vakavan henkilövahingon vuoksi. [31]

Vianpaikannuksen suorat kustannukset muodostuvat vianpaikannuksen suorittamisesta, mahdollisista turvallisuusriskien aiheuttamista vahingoista ja vianpaikannuksen tarkkuudesta, mikä vaikuttaa kaapelin korjauksesta aiheutuviin kustannuksiin. Suorat kustannukset riippuvat vianpaikannukseen käytettävästä ajasta, vianpaikannuksen suorittamiseen käytettävien laitteistojen ja palveluiden hinnoista sekä mahdollisten turvallisuusriskien vakavuudesta. Vianpaikannuksen viivästyminen kasvattaa henkilöstöstä ja vianpaikannusaluksesta aiheutuvia kustannuksia. [31]

Suorat kustannukset riippuvat myös hyvin vahvasti vianpaikannuksen tarkkuudesta [31]. Kaapelin katkaiseminen väärästä paikasta kasvattaa varaosista aiheutuvia suoria kustannuksia. Epämääräinen paikannustulos kasvattaa viankorjauksesta aiheutuvia suoria kustannuksia, koska tarvittavan varakaapelin määrä kasvaa tai kaapeliin joudutaan tekemään ylimääräisiä kaapelijatkoksia. Ylimääräisiä kaapelijatkoksia joudutaan tekemään, jos kaapeli on katkaistu kaukaa vikapaikasta, eikä varakaapelin käyttäminen ole taloudellisesti kannattavaa tai määrällisesti riittävää. Kaapelijatkoksen tekeminen ei ole mahdollista meressä, jolloin korjaamiseen tarvitaan myös ylimääräistä kaapelin riippuen meren syvyydestä. Epämääräinen paikannustulos voi kasvattaa myös viankorjaukseen käytettävää aikaa, jos kaapelin joudutaan tekemään ylimääräisiä korjauksia. [41]

Vianpaikannuksen epäsuoria kustannuksia ovat kansantaloudelliset ja keskeytyksestä aiheutuneet haitat. Vianpaikannuksen viivästyminen kasvattaa hyvin todennäköisesti epäsuoria kustannuksia. Epäsuorat kustannukset riippuvat sähkömarkkinatilanteesta, minkä vuoksi niiden aiheuttamia kustannuksia on hyvin vaikea arvioida, kuten luvuss 2.3 ollaan todettu. [1, 24, 31]

Turvallisuusriskeistä aiheutuvat henkilövahingot saattavat viivästyttää vianpaikannusta aiheuttaen kustannuksia. Vakava henkilövahinko voi kokonaan pysäyttää vianpaikannuksen, kasvattaen täten merkittävästi vianpaikannukseen käytettävää aikaa. Lisäksi laiterikot ja tulipalot kasvattavat vianpaikannuksen kustannuksia. [47]

Vianpaikannuksesta aiheutuvia riskejä voidaan minimoida nopealla ja tarkalla vianpaikannuksella sekä oikeilla ohjeistuksilla ja koulutuksilla [2, 35, 36]. Vianpaikannukseen

käytettävä aika vaikuttaa merkittävästi kustannuksiin, jolloin nopealla paikannuksella saadaan minimoitua kustannusriskejä. Vian tarkalla paikannuksella voidaan vaikuttaa suoriin kustannuksiin. Tarkalla vianpaikannuksella kaapelin katkaisu voidaan suorittaa mahdollisimman läheltä vikapaikkaa, jolloin viankorjauksessa tarvittavan varakaapelin määrä on mahdollisimman vähäinen ja välttyään ylimääräisten kaapelijatkosten tekemiseltä [41]. Tarkan vianpaikannuksen tekeminen väärältä alueelta kasvattaa vianpaikannukseen kuluva-aikaa, mikä johtaa kustannusten kasvuun. Karkeassa vianpaikannuksessa on otettava huomioon karkeiden vianpaikannusmenetelmien ja niissä käytettävien mittalaitteiden virhemarginaalit, jotta tarkka vianpaikannus suoritetaan oikealta alueelta. [35]

Vianpaikannukseen käytetyllä ajalla on merkittävä vaikutus muodostuneisiin kokonaiskustannuksiin. Vianpaikannuksessa on kuitenkin toimittava siten että aikatauluriskien välttämisestä ei aiheudu tarpeettomia henkilöriskejä. [47]

### **3.4.3 Vianpaikannuksen epäonnistumisen esimerkitapauksia**

Vianpaikannuksen epäonnistuminen voi aiheuttaa merkittäviä kustannuksia. Kaapelin vianpaikannus on haasteellista, jolloin vikapaikkaa ei saada välttämättä paikannettua, jos vikaa ei nähdä ulkoisesti [2]. Tästä esimerkkinä on vuonna 2015 Kaakkois-Australian Viktorian osavaltion ja Tasmanian saariosavaltion välisen Basslink-HVDC-yhteyden kaapelivika. Vian kokonaiskesto oli melkein puoli vuotta, josta kaapelivian paikantamiseen kului noin kolme kuukautta. Kaapelivian paikantamista vaikeutti vian sijaitseminen 80 metrin syvyydessä meressä ja 90,5 kilometrin päässä Tasmanian rannikolta, missä näkyvyys meressä oli erittäin huono. Vähäisen oman energiatuotannon ja kaapelivian seurauksena Tasmanian osavaltio ajautui energiakriisiin, jolloin kaapelivian epäsuorat kustannukset nousivat hyvin korkeiksi. Lisäksi kaapelin vianpaikannuksen suorat kustannukset kasvoivat korkeiden henkilötyötuntimäärien ja paikannukseen käytettyjen laivojen ja ROV:ien käyttökustannusten vuoksi. [48]

Tarkka vianpaikannus on tärkeää, jotta kaapeli voidaan katkaista oikeasta kohdasta. Esimerkki kaapelin katkaisemisesta kaukaa vikakohdasta on vuonna 2003 tapahtunut Ranskan ja Iso-Britannian välisen IFA2000-HVDC-yhteyden kaapelivika, jonka kokonaiskesto oli noin 83 päivää [49]. Kaapeli katkaistiin karkealla vianpaikannuksella saadun tuloksen mukaan, vaikka karkean vianpaikannusmenetelmän tarkkuudesta ei ollut varmuutta huonojen lähtötietojen vuoksi. Lisäksi reitti koostui maa- ja merikaapeliosuudesta, joka vaikutti vianpaikannuksen tarkkuuteen heikentävästi. Vika sijaitti 1,7 kilometrin päässä ensimmäisestä katkaisukohdasta, minkä takia kaapeliin tehtiin kaksi katkaisua ja neljä kaapelijatkosta, koska varakaapelin käyttäminen näin pitkältä alueelta ei ole taloudellisesti kannattavaa [50]. Tästä johtuen varaosa kustannukset ja viankorjaukseen käytettävä aika kasvoivat. Lisäksi viankorjausta häirttasivat huonot sääolosuhteet, minkä vuok-

si 40 % viankorjauksen kokonaiskestoista kului sääolosuhteiden parantumisen odottamiseen. [49, 50]

Vianpaikannus voi viivästyä, jos tutkittava alue ei ole tarpeeksi laaja, jolloin tarkka vianpaikannus suoritetaan väärältä alueelta. Karkeat vianpaikannusmenetelmät ja -laitteet eivät ole tarkkoja, koska lähtötiedot ja vianpaikannuslaitteet sisältävät aina epätarkkuuksia. Tämän vuoksi tutkittavan alueen tulee olla riittävän laaja, ottaen huomioon karkeiden vianpaikannusmenetelmien tarkkuudet. [35] Esimerkiksi vuonna 2000 Koreassa sijaitsevan Haenam - Jeju -HVDC-yhteyden 101 kilometriä pitkän merikaapelin vika paikannettiin kahdella karkealla vianpaikannusmenetelmällä 13,2–14,7 kilometriin rannikolta [51]. Tarkalla vianpaikannuksella vika paikannettiin 13,08 kilometriin rannikolta, jolloin karkean vianpaikannuksen rajaamalta alueelta vikaa ei olisi löydetty.

Vianpaikannuksen epäonnistumiseen voi vaikuttaa monta eri tekijää, joiden tunnistaminen voi olla hankalaa. Kaapelivioista saatujen kokemusten ja tietojen jakamisella pienennettäisiin vianpaikannukseen liittyviä riskejä, sekä parannettaisiin kaapeleiden luotettavuutta ja käytettävyyttä. Myös onnistuneiden kokemusten jakaminen on tärkeää, jotta hyviä käytäntöjä pystytään käyttämään seuraavassa kaapeliviassa. Salassapitosopimusten ei tulisi estää vikoihin liittyvää tiedon jakamista HVDC-yhteyksien omistajien kesken. [3]

## 4. SUURJÄNNITTEISEN TASASÄHKÖKAAPELIN VIANPAIKANNUSMENETELMÄT

Kaapelin vianpaikannukseen liittyvät periaatteet ja tekniikat ovat hyvin tunnettuja. Kehittyneet vianpaikannusmenetelmät mahdollistavat entistä tarkemman vianpaikannustuloksen, jos niitä osataan soveltaa ja tulkita oikein [52]. Kaapelin vianpaikannus jaetaan karkeaan ja tarkkaan vianpaikannukseen vianpaikannusmenetelmän yleisen tarkkuuden perusteella. Karkeassa vianpaikannuksessa vika-alue saadaan usein rajattua pienelle alueelle verrattuna kaapelin koko pituuteen. Tarkassa vianpaikannuksessa pyritään rajaamaan karkeassa vianpaikannuksessa saatu vika-alue siten että kaapelivika nähdään visuaalisesti tai että kaapeli voidaan katkaista luotettavasti, jos vikaa ei nähdä ulkoisesti. [2, 25, 35]

Vianpaikannusmenetelmät voidaan jakaa vielä on-line ja off-line menetelmiin [53]. On-line menetelmissä kaapelia valvotaan reaaliaikaisesti ja vian karkea sijainti pystytään määrittämään heti vian jälkeen. Tässä työssä tarkastellaan vain off-line menetelmiä, joissa vianpaikannus tehdään kaapelin vikaantumisen jälkeen. [54] Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan karkean ja tarkan vianpaikannuksen menetelmiä, sekä arvioidaan niiden soveltuvuutta eri vikatyypeille.

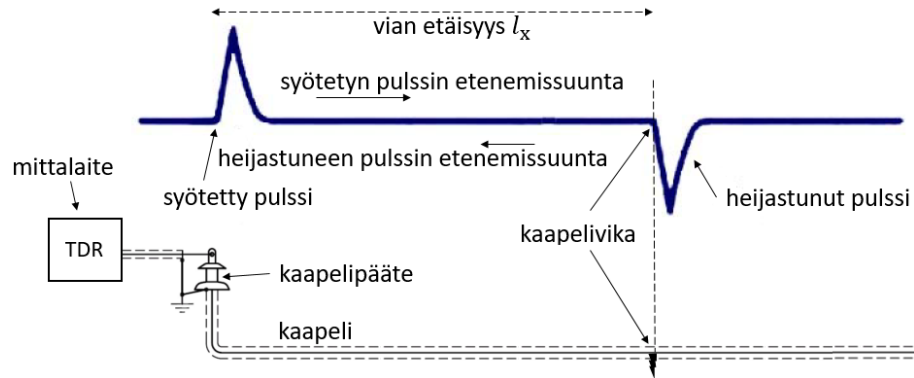
### 4.1 Karkean vianpaikannuksen menetelmät

Karkean vianpaikannukseen on paljon eri menetelmiä, mutta monet menetelmistä eivät sovellu pitkille kaapeleille [2]. Tässä kappaleessa käsitellään vain muutamia yleisimpiä, vakiintuneimpia ja Fingridin kaapeleille sopivia menetelmiä.

Yksi käytetyimpiä menetelmiä karkeassa vianpaikannuksessa on kulkuaallon etenemiseen ja heijastumiseen perustuva TDR-mittaus [42]. TDR-mittauksessa kaapeliin syötetään pienijännitteinen pulssisignaali, joka kulkee kaapelissa tietyllä etenemisnopeudella  $v$  [26]. Etenemisnopeuteen vaikuttavat kaapelin rakenne ja siitä esimerkiksi eristyksen ja puolijohtavien kerrosten materiaalit [6]. Etenemisnopeus on jokaiselle kaapelille yksilöllinen, jolloin sen määrittämiseen käytetään kalibrointimenettelyä. Kalibroinnissa kaapelin toinen pää jätetään avoimeksi tai oikosuljetaan, ja kaapeliin syötetään pulssi. Etenemisnopeus voidaan laskea kaapelin kokonaispituudesta ja syötetyn pulssisignaalin kulkuajasta kaapelin toiseen päähän ja takaisin. Kaapelin toinen pää on kulkuaallolle epäjatkuvuuskohta, jossa kulkuaalto heijastuu osittain takaisin ja osittain jatkaa



matkaansa. Epäjatkuvuuskohtalla voidaan myös tarkoittaa kaapelijatkosta, kaapelivikaa tai muuta kohtaa, jossa kaapelin aaltoimpedanssi muuttuu [17]. Kuvassa 4.1 on esitetty TDR-mittauksen periaatekuva, jossa kaapelipäätteeltä syötetään kaapeliin pienijännitteinen pulssi, joka heijastuu takaisin kaapelivian aiheuttaman impedanssin muutoksen kohdassa. [36]



**Kuva 4.1.** TDR-mittauksen kulkuvaallon eteneminen kaapelipäätteeltä kaapelivikaan ja takaisin, muokattu lähteestä [35, 36].

Kaapeliin on syötettävä amplitudiltaan riittävän suuri pulssi, jotta heijastunut pulssi on amplitudiltaan riittävän suuri havaittavaksi, koska kaapelissa tapahtuvat häviöt vaimentavat pulssia [36]. Vikapaikan etäisyys saadaan laskettua kaavalla (4.1)

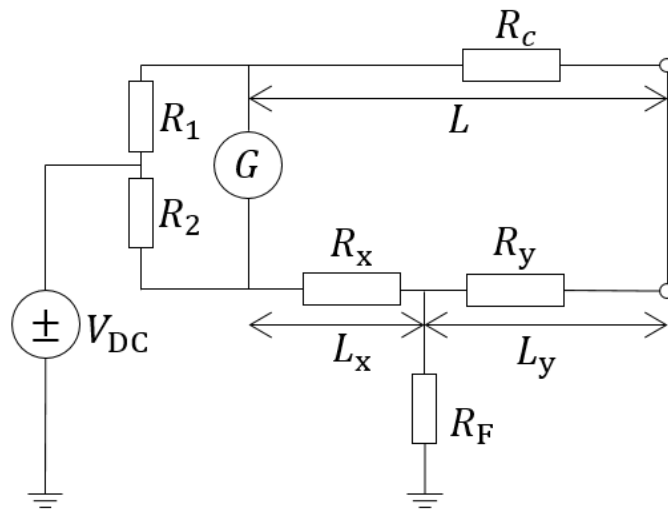
$$l_x = \frac{t_x}{2}v \quad (4.1)$$

jossa  $l_x$  on vian etäisyys mittaustaikasta ja  $t_x$  on pulssin kulku-aika impedanssin muutoskohtaan ja takaisin. Kaapelivian tyyppi pystytään määrittämään heijastuneen pulssin polariteetista ja amplitudista, jos heijastuneen pulssin amplitudi on riittävän suuri huomattavaksi. Sarjaviassa heijastuminen on positiivinen, sillä vikaresistanssi ja kaapelin aaltoimpedanssi ovat sarjassa. Rinnakkaisviassa heijastuminen on negatiivinen, koska vikaresistanssi kytkeytyy rinnakkain kaapelin aaltoimpedanssin kanssa, jolloin vikakohtassa kaapelin resistanssi pienenee. Suuriresistanssisissa rinnakkaisvioissa ja pieniresistanssisissa sarjaviassa kaapelin aaltoimpedanssiin ei synny huomattavaa eroa vikakohtassa, jolloin myöskin vikakohtassa heijastunut pulssi jää pieneksi. Tämän vuoksi TDR-mittauksella pystytään havaitsemaan pieniresistanssiset rinnakkaisviat ja suuriresistanssiset sarjaviat. [6, 36] IRC-kaapelin paluujohdinten maasulkuvuissa syötetyn pulssin paluureitti sijaitsee maaperässä, jolloin pulssi vaimenee nopeammin johtuen suuremmista häviöistä [7]. Tämä rajoittaa TDR-mittauksen käyttämistä koaksiaalikaapelin paluujohdinten maasulkuvuissa.

Suuriresistanssinen rinnakkaisvika voidaan niin sanotusti polttaa pieniresistanssiseksi syöttämällä kaapeliin jännitteeltään ja virraltaan riittävän suurta pulssia. Riittävän suuri

jännite aiheuttaa läpilyönnin vikapaikassa ja virralla poltetaan vikareitti pieniresistanssiseksi, jolloin vikakohta saadaan TDR-mittauksella helpommin havaittavaksi. Vikapaikan polttaminen sopii öljypaperieristeisille kaapeleille, mutta ei niin hyvin muovieristeisille kaapeleille [36, 6]. Muovieriste pehmenee polttamisen aikana, mutta palaa taas kiinteäksi polttamisen jälkeen, jolloin vikaresistanssin muutos voi olla pieni [6]. Vian polttaminen ei itsessään ole vianpaikannusmenetelmä, koska sillä ei saada vian sijaintia selville, mutta sen avulla mahdollistetaan joidenkin vianpaikannusmenetelmien käyttäminen. [6, 42]

Jos vikapaikan polttaminen ei onnistu, voidaan karkea vianpaikannus suorittaa siltamittauksella (bridge method). Siltamittauksen käyttäminen edellyttää vikaantuneen kaapelin lisäksi ehjän paluupiirin, jolla on tunnettu resistanssi [36, 6]. Kuvassa 4.2 on esitetty Murrayn siltamittauksen (Murray loop) yksinkertaistettu piirikaavio.



**Kuva 4.2.** Murrayn sillan yksinkertaistettu piirikaavio, muokattu lähteestä [36].

Siltamittaus perustuu kaapelipituuksien resistanssien vertailuun vikapaikasta katsottuna. Vikaantunut kaapeli jakaantuu tuntemattomiin resistansseihin  $R_x$  ja  $R_y$  sekä pituuksiin  $L_x$  ja  $L_y$ . Ehjällä paluupiirillä on tunnettu resistanssi  $R_c$  ja pituus  $L$ . Vikaantunut ja ehjä kaapeli oikosuljetaan toisesta päästä, jolloin niiden välille muodostuu kytkentävastus. Siltamittauslaitteessa on säätövastukset  $R_1$  ja  $R_2$ , tasajännitelähde  $V_{DC}$  ja galvanometri  $G$ . Silta tasapainotetaan säätövastusten avulla siten että galvanometrillä ei kulje virtaa. [24, 36] Kaapelin resistanssi on suoraan verrannollinen sen pituuteen, jolloin vikapaikan etäisyys voidaan laskea kaavalla (4.2)

$$L_x = 2L \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (4.2)$$

jossa  $L_x$  on vikapaikan etäisyys siltamittauslaitteelta vikakohtaan vikaantuneessa kaapelissa [36]. Etäisyyden laskemisessa pitää ottaa huomioon tekijät, jotka vaikuttavat kaapelin resistanssiin. Näitä tekijöitä ovat ehjän ja vikaantuneen kaapelin pituuserot, johtimien

poikkipinta-alojen erot sekä johdinmateriaalin ja -lämpötilan muuttuminen yhteyden varrella. Kaava (4.2) pätee vain tapauksille, jossa ehjän paluureitin ja vikaantuneen kaapelin resistanssit ovat samat ja pysyvät vakiona koko kaapelin pituudelta. Murrayn sillan mitaus sopii pieni- ja suuriresistanssisille vioille ja sitä voidaan käyttää bipolaariyhteyksille ja monopolaariyhteyksille, joissa on ehjä paluupiiri. [24, 36] Murrayn silta sopii myös kaapelin vaipan vikojen paikantamiseen, jolloin kaapelin johdinta voidaan käyttää paluupiirinä [36].

Edellä mainitut menetelmät soveltuvat käytettäväksi vain jatkuville vioille. Decay-menetelmä (decay method) sopii ajoittaisille vioille, joilla tarkoitetaan vikoja, joissa kaapelin vikakohdan läpilyöntijännite pysyy suurempana kuin käytettävän jännitelähteen nimellijännite. Decay-menetelmässä kaapelia varataan yhtäjaksoisesti HVDC-jännitelähteen avulla, kunnes kaapelin varaus on riittävän suuri aiheuttamaan läpilyönnin kaapelissa. Kaapelin kapasitiivinen varaus purkautuu vian läpi synnyttäen samalla jännitepulssin takaisin jännitelähteelle, josta se heijastuu takaisin vikapaikkaan polariteettia muuttamatta. Vikapaikassa jännitepulssin polariteetti muuttuu ja se jatkaa heijastumista oskilloiden syöksyaaltogeneraattorin ja vikapaikan välillä. [6] Vikapaikan etäisyys  $l_x$  signaalin syöttämispisteestä voidaan laskea kaavalla (4.3)

$$l_x = \frac{t_x}{4}v \quad (4.3)$$

jossa  $t_x$  on pulssin kulkuaika ensimmäisestä jännitepulssista seuraavaan heijastuneeseen saman polariteetin jännitepulssiin. Kokonaiskulkuaika pitää jakaa neljällä, koska yhden mittausjakson aikana pulssi kulkee neljästi mittauskohdan ja vikakohdan välillä. [6, 36]

Karkealla vianpaikannuksella voidaan saavuttaa hyviä paikannustuloksia suhteutettuna kaapelin kokonaispituuteen. Tämä vaatii esimerkiksi kaapelivian tunnistamisen, sopivan menetelmän käyttämisen, tarkan tiedon kaapelin pituudesta, tiedon kaapelijatkosten paikoista ja koulutetun henkilön paikantamaan vikaa ja tulkitsemaan saatuja paikannustuloksia. [35, 36] Lisäksi eri menetelmiä käyttämällä voidaan varmistaa karkeassa vianpaikannuksessa saatua vikakohdan sijaintia ja rajata vika-alue tarkemmin [4].

Kolmansien osapuolten aiheuttamissa vahingoissa tieto vian sijainnista voidaan saada AIS-järjestelmästä (Automated Information System), jota käytetään laivaliikenteessä alusten tunnistamiseen ja sijainnin paikantamiseen. Kaapelivika voi olla aiheutunut esimerkiksi laivan ankkurista, jos kaapelireitillä on ollut laivaliikennettä vian tapahtumisen aikana. AIS-järjestelmää voidaan hyödyntää suoraan karkeana vianpaikannusmenetelmänä tarkastelemalla laivaliikennettä kaapelin reitillä heti vian havaitsemisen jälkeen. Tällöin pystytään tehostamaan karkeaa vianpaikannusta ja mahdollisesti löytämään ankkurin aiheuttamat jäljet merenpohjassa ja kaapelissa. [41]

## 4.2 Karkean vianpaikannuksen rajoitteet

Karkealla vianpaikannuksella kaapelivika saadaan usein rajattua lyhyelle alueelle suhteessa kaapelin koko pituuteen [36]. Kuitenkin esimerkiksi yhden prosentin epätarkkuus tarkoittaisi kahden kilometrin tutkittavaa aluetta, jos kaapelivika sijaitsisi 100 kilometrin päässä mittauspaikasta. Kaapelin vaihtaminen tällaiselta alueelta ei ole taloudellisesti kannattavaa, koska merikaapeli on erittäin kallista. Esimerkiksi Fenno-Skan 2 -kaapelin hankintahinta oli noin 150 miljoonaa euroa, jolloin 2 kilometrin pituinen kaapeli vastaa noin 1,5 miljoonaa euroa [55].

Kulkuaaltoihin perustuvien karkeiden vianpaikannusmenetelmien paikannustarkkuuteen vaikuttavat kaapelin epäjatkuvuuskohtien sijainti ja sijainnin tarkkuus, tieto kaapelin kokonaispituudesta ja tarkkuudesta sekä kaapelin kulkuaallon etenemisnopeuden tarkkuus. Epäjatkuvuuskohdissa kaapelin aaltoimpedanssi muuttuu aiheuttaen ylimääräisiä kulkuaallon heijastumisia. Nämä voivat häiritä vikapaikan määrittystä ja pahimmassa tapauksessa johtaa vikapaikan väärään määrittelyyn. Kaapelijatkosten paikat ovat yleensä kaapelin omistajien tiedossa, mikä helpottaa vianpaikannustuloksen tulkitsemista. [35, 42] Mahdollisimman tarkka tieto kaapelin kokonaispituudesta mahdollistaa tarkemman laskentatuloksen kaapelivian etäisyydelle, koska pulssin etenemisnopeus lasketaan pulssin kulkuajasta kaapelissa. Kulkuaallon etenemisnopeudella on suuri vaikutus tulokseen [35]. Etenemisnopeus on jokaiselle kaapelille yksilöllinen, mikä on huomioitava yhteyksillä, jotka koostuvat useammista eri kaapeleista [42]. Etenemisnopeus ei pysy vakiona koko kaapelin elinkaaren ajan, koska kaapelin eristemateriaali voi ikääntyä eri tavoin kaapelin eri osissa [17]. Tämän vuoksi sormenjälkitunnistus on hyvä suorittaa tasaisin väliajoin.

Kaapelivian polttamisella saattaa olla myös negatiivisia vaikutuksia vianpaikannukseen. Vika poltetaan pysyvästi pieniresistanssiseksi, mikä mahdollisesti rajoittaa esimerkiksi akustisten menetelmien käyttöä tarkassa vianpaikannuksessa. Lisäksi öljypaperieristeisen kaapelin eriste hiihtyy vian polttamisen aikana, jolloin vian alkuperäistä syytä ei välttämättä saada selville. [6]

## 4.3 Tarkat vianpaikannusmenetelmät

Merikaapelit ovat usein haudattuina tai hautautuneina merenpohjaan, jolloin niiden visuaalinen tarkastus karkean vianpaikannuksen jälkeen vaatii kaapelin kaivamista esiin merenpohjasta. Kaapelivian löytäminen visuaalisella tarkastuksella voi olla mahdotonta, koska vikapaikka ei välttämättä näy ulospäin. Useimmissa tarkoissa vianpaikannusmenetelmissä kaapelin esiin kaivaminen maan- tai merenpohjasta vikapaikan määrittämiseksi ei ole välttämätöntä, riippuen käytetystä menetelmästä. [2, 24] Tällöin kaapeliin ei aiheudu ylimääräisiä mekaanisia rasituksia eikä sen esiin kaivamisesta aiheudu turhia lisäkustannuksia [2, 36].

Merellä suoritettava työ on usein kallista, koska korjaukseen vaaditaan erikoisrakenteinen alus, erikoistyökalut ja koulutettu miehistö [24]. Keskeytyksestä aiheutuvia suoria kustannuksia voidaan pienentää ennakkoon suoritettavalla tarkalla vianpaikannuksella, koska se voidaan suorittaa varsinaista viankorjausalusta pienemmällä ja halvemmalla aluksella riippuen vian sijainnista [31]. Tällöin kallista korjausalusta tarvitaan mahdollisesti vain kaapelin ylös nostamiseen ja korjaamiseen, jos vika on paikannettu onnistuneesti.

Tarkan vianpaikannusmenetelmän sopivuus on riippuvainen kaapelin vikatyypistä. Käytettävän menetelmän valintaan ja soveltamiseen vaikuttavat myös hyvin vahvasti kaapelin rakenne, asennustapa sekä kaapelivian sijainti. [24, 25] Tässä kappaleessa käydään läpi käytetyimpiä tarkkoja vianpaikannusmenetelmiä ja niiden soveltuvuutta eri vikatyypeille sekä kaapeleille.

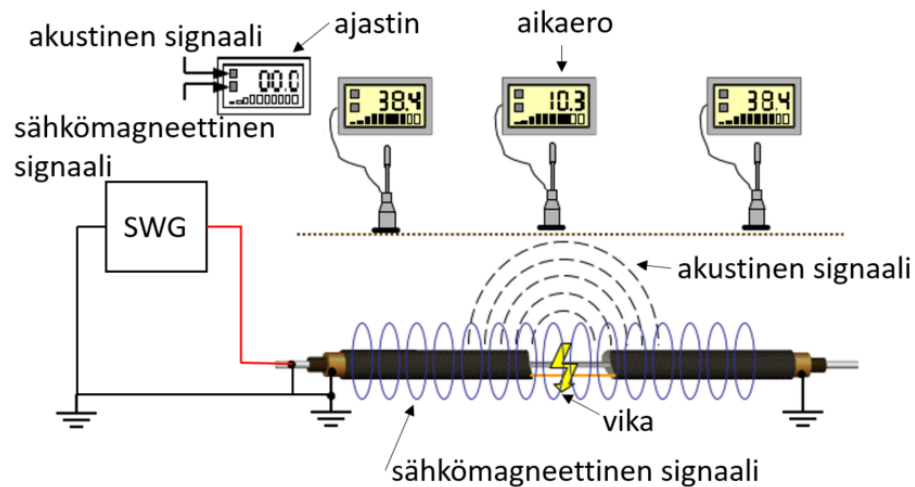
### 4.3.1 Akustinen menetelmä

Akustinen menetelmä perustuu vikapaikassa läpilyönnin yhteydessä syntyvään akustiseen signaaliin havaitsemiseen siihen sopivalla kuuntelulaitteella. Kaapeliin syötetään syöksyaaltogeneraattorilla (SWG, Surge Wave Generator) toistuvia jännitepulsseja, jotka aiheuttavat vikapaikassa läpilyönnin kaapelin eristeessä. Läpilyönnin yhteydessä syntyy akustinen signaali, joka etenee paineaaltona maata tai merta pitkin. Syntynyt paineen vaihtelu voidaan havaita maalla mikrofoniin ja merellä hydrofoniin [35]. Mikrofonin ja hydrofonin muuttavat paineen vaihtelun jännitteen vaihteluksi, joka vahvistetaan ihmiselle kuultavaksi signaaliksi. [6, 42]

Vikapaikka voidaan paikantaa akustisen signaalin amplitudin avulla, jolloin paikannus suoritetaan haarukoimalla kaapelin ympäristöä kuuntelulaitteella. Äänenvoimakkuuden kasvaessa vikapaikka lähestyy ja toisinpäin. Akustisessa menetelmässä oletetaan, että syntynyt signaali etenee suoraan pinnalle esteettömästi, jolloin akustisen signaalin amplitudi on korkeimmillaan kohtisuoraan vian yläpuolella. Käytännössä kaapelin asennustapa ja ympäristö vaikuttavat signaalin etenemiseen, jolloin signaalin amplitudi ei ole välttämättä korkeimmillaan kohtisuoraan vian yläpuolella. Esimerkiksi putkeen asennettu kaapeli tai kaapelin ympärillä olevat puunjuuret voivat haitata signaalin etenemistä. [6]

Toinen tapa paikantaa vika akustisen signaalin avulla on mitata vikapaikassa syntyvän akustisen signaalin ja kaapelissa syntyvän sähkömagneettisen signaalin etenemisnopeuksien välistä aikaeroa (propagation time measurement). Kuvassa 4.3 on havainnollistettu signaalien etenemisnopeuksien välisten aika-erojen mittaamista. Syöksyaaltogeneraattorilla syötettävät jännitepulssit synnyttävät kaapelissa sähkömagneettisen signaalin ja vikapaikan ympäristöön akustisen signaalin, joka voidaan havaita sopivalla vastaanottimella. Sähkömagneettisen signaalin etenemisnopeus on suurempi kuin akustisen signaalin,

minkä johdosta sähkömagneettinen signaali aktivoi vastaanottimen ajastimen, joka pysähtyy akustisen signaalin saavuttua vastaanottimelle. Syntyvästä aikaerosta voidaan päätellä vian sijainti. [42]



**Kuva 4.3.** Akustisen ja sähkömagneettisen signaalien etenemisnopeuksien aikaeroon perustuva menetelmä, muokattu lähteestä [56].

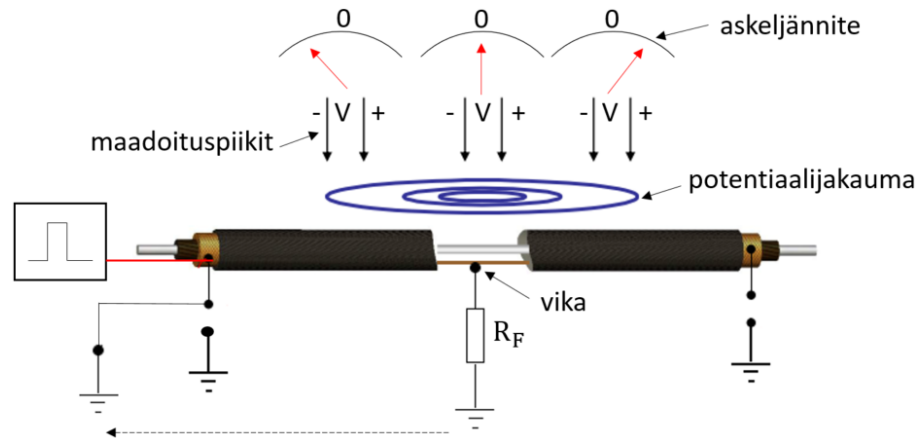
Paikannus perustuu akustisen ja sähkömagneettisen signaalien eri etenemisnopeuksiin, jolloin signaalit saapuvat eri aikaan kuuntelulaitteen vastaanottimelle. Signaalien havaitsemisen välinen aikaero pienenee vikapaikan lähestyessä ja on pienimmillään kohtisuoraan vikapaikan yläpuolella kuten kuvasta 4.3 voidaan huomata. Mikäli vikaa paikannettaisiin kuuntelemalla, se toteutettaisiin kuten kuvassa 4.3, mutta mitattaisiin vain akustisen signaalien voimakkuutta. Tällöin vian sijainti voidaan paikantaa kohtaan, jossa signaalien voimakkuus on suurimmillaan. [6, 42]

Edellä mainitut akustiset menetelmät sopivat suuriresistanssisiin sarja- ja rinnakkaisvikoihin sekä ajoittain esiintyviin vikoihin. Pieniresistanssisten rinnakkaisvian paikantaminen akustisella menetelmällä on hankalaa, koska vikapaikassa syntyvä signaali on hyvin pieni. Etenemisnopeuksien aikaeron mittaus sopii paremmin olosuhteisiin, joissa kaapelin asennustavasta tai ympäristöstä voi aiheutua epätarkkuutta paikannustulokseen. Tällöin häiriölähteet eivät vaikuta paikannustuloksen tarkkuuteen, koska menetelmä perustuu vain kuluneeseen aikaeroon kahden signaalien välillä. [6, 42] Akustisia menetelmiä käytetään yleisesti maakaapeleiden tarkassa vianpaikannuksessa [36], mutta akustiset menetelmät sopivat käytettäväksi myös merikaapeleilla [35].

### 4.3.2 Askeljännitteen mittaus

Askeljännitteen mittaus (step voltage method) on haudatuille maakaapeleille sopiva tarkka vianpaikannusmenetelmä, joka perustuu askeljännitteen mittaamiseen [42]. Askeljännitteellä tarkoitetaan metrin päässä toisistaan olevien pisteiden välistä potentiaaliero [9].

Kuvassa 4.4 on havainnollistettu askeljännitteen mittaamista kolmessa eri pisteessä kaapelivian aikana. Kaapeliin syötetään suurjännitteistä tasajännitepulsseja, joka purkautuu vikapaikassa maaperään aiheuttaen maasulun. Vikapaikassa virta kulkeutuu maaperään, jolloin maaperään syntyy potentiaalijakauma. Jakauman potentiaalieron askeljännitteitä voidaan mitata maanpinnalta kahden pisteen väliltä maadoituspiikkien avulla. [6, 42]



**Kuva 4.4.** Askeljännitteen mittaaminen kolmesta eri kohdasta kaapelivian aikana, muokattu lähteestä [56].

Askeljännite on korkeimmillaan vikapaikan läheisyydessä, mutta vian kohdalla askeljännite on nolla, kuten kuvassa 4.4 on esitetty. Askeljännitteen polariteetti on erimerkkinen vian molemmilla puolin, jolloin vika voidaan paikantaa nollakohdan avulla. [57]

Askeljännitteen mittaukseen perustuva menetelmä sopii vain maasulkuvikoihin, koska ainoastaan maasulkuviat synnyttävät potentiaalieron maaperään [57]. Menetelmä sopii myös tilanteille, jossa vikoja on enemmän kuin yksi. Tällöin on huomioitava jokaisessa vikapaikassa syntyvät polariteetin vaihdokset, jotta vianpaikannus onnistuu. [42] Askeljännitteen mittaus mittaukseen perustuvaa menetelmää on teoriassa mahdollista käyttää myös merikaapeleilla, jolloin askeljännitettä voidaan mitata esimerkiksi kahdella elektrodilla [43]. Askeljännitteen syntyyn saattaa vaikuttaa kaapelin ympäristössä olevat metalliset esineet, joihin kaapelin maasulkuvirta saattaa kulkeutua [39].

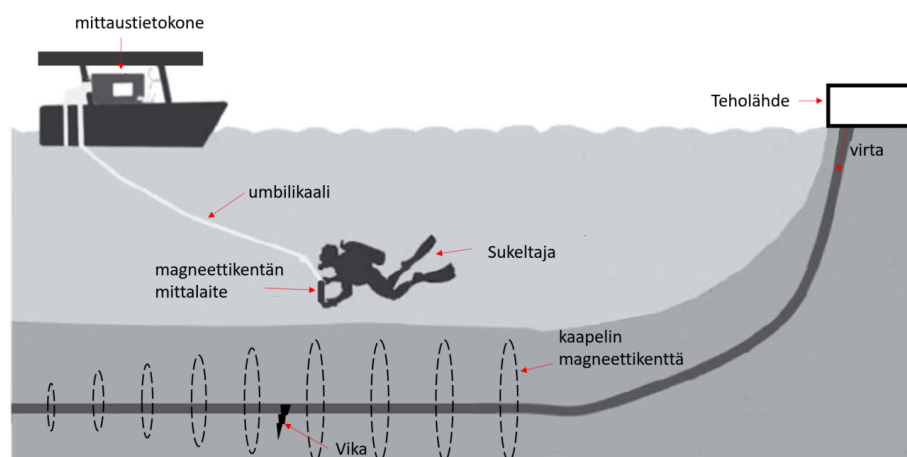
### 4.3.3 Magneettikentän mittaus

Kaapelissa syntyvää magneettikenttää voidaan hyödyntää tarkassa vianpaikannuksessa. Kaapelissa syntyvä magneettikenttä riippuu kaapelin kuormitusvirrasta, joka syötetään vikaantuneeseen kaapeliin ulkoisesta teholahteesta. Ulkoisen teholahteenä käytetään yleisesti signaaligeneraattoria, jolla syötetään kaapelin matalataajuista vaihtovirtaa, joka synnyttää ajassa muuttuvan magneettikentän kaapelin ympäristöön tai syöksyaaltogeneraattorilla suurjännitteistä pulssia. Signaaligeneraattorilla voidaan syöttää kaapeliin eritaajuisia signaaleita, mikä voi helpottaa vianpaikannusta. [24, 46]

Magneettikenttää voidaan mitata esimerkiksi fluxgate-magnetometrillä, jonka toimintaperiaatetta tarkastellaan tarkemmin kappaleessa 5.4. Magneettikentän mittaaminen voidaan toteuttaa veden pinnalta tai vedenpinnan alla. Syvässä vesissä magneettikenttää mittaava magnetometri kiinnitetään ROV:iin ja matalissa vesissä magnetometriä voidaan pitää veneen ulkopuolella tai kuljettaa sukeltajan mukana [24]. Esimerkiksi RTE on kehittänyt laitteiston, joilla kaapelivika voidaan havaita vedenpinnan yläpuolelta n.oin 80–100 metrin syvyyteen asti [4]. Magneettikentän mittaukseen perustuvan menetelmän onnistuminen ja tarkkuus on hyvin riippuvainen saadun mittausdatan tulkittamisesta. Mittausdatan tulkitsijan vastuulla on ohjeistaa sukeltajaa tai ROV:n käyttäjää kulkemaan kaapelireittiä pitkin, jos kaapeli tai kaapelireitin jäljet eivät ole näkyvissä. [43]

Magnetometri on kiinnitettävä ei-magneettiseen runkoon tai mittauspähän, jolloin magneettikentän mittaukseen ei aiheudu ylimääräisiä häiriöitä. Voimakas aaltoilu heikentää vedenpinnan yläpuolelta suoritettavan vianpaikannuksen mittaustarkkuutta, minkä lisäksi mittalaitteen etenemisnopeus vaikuttaa mittaustarkkuuteen [4, 46]. Menetelmään liittyviä häiriöitä ja niiden minimoimista käsitellään tarkemmin kappaleissa 5.3.2 ja 5.3.3.

Kuvassa 4.5 on havainnollistettu magneettikentän mittaamista merellä tilanteessa, jossa mittaus suoritetaan sukeltajan tai ROV:n avulla vedenpinnan alla. Teholähteestä kaapeliin syötettävä virta synnyttää kaapelin ympäristölle magneettikentän, jota mitataan magneettikenttää mittaavalla laitteella. Vedenpinnan yläpuolella sijaitsevalta mittaustietokoneelta voidaan tulkita vian sijainti. Kaapelivika paikantuu alueelle, jossa magneettikentän voimakkuus pienenee [4]. Magneettikentän mittaamista vikatilanteessa käsitellään tarkemmin kappaleessa 5.3.1.



**Kuva 4.5.** Havainnekuva magneettikentän mittaamisesta merellä, muokattu lähteistä [6, 58].

Kaapelissa syntyvän magneettikentän hyödynnettävyys kaapelin vianpaikannuksessa riippuu paljon kaapelin asennustavasta ja syötettävästä signaalista, koska nämä tekijät vaikuttavat eniten magneettikentän muutoksen havaittavuuteen. Kaapelin hautausyvyys vaikuttaa magneettikentän havaittavuuteen, koska kaapelin luoma magneettikenttä heikkenee nopeasti etäisyyden kasvaessa kaapelista. Lisäksi meno- ja paluuvirtapiirin sijoittaminen



lähellä toisiaan heikentää magneettikentän amplitudia, koska magneettikentät kumoavat osittain toisensa. Kaapeleissa syntyvää magneettikenttää ja sen havaittavuutta käsitellään tarkemmin luvussa 5. [59]

Magneettikentän mittaaminen sopii parhaiten suuriresistanssisille sarjavioille, pieniresistanssisille rinnakkaisvioille ja kaapelin vaipan vioille sekä maalla että meressä. Näissä viikatilanteissa kaapelin kautta kulkeva vikavirta on pieni, koska suurin osa virrasta kulkee takaisin maaperän tai meren kautta. Mitä enemmän virtaa kulkee takaisin maaperän tai meren kautta, sitä helpompi vika on paikantaa kaapelin muodostamaa magneettikenttää mittaamalla, koska tällöin magneettikentän muutos havaitaan helpommin. [4, 43]

#### 4.4 Tarkan vianpaikannuksen epävarmuustekijät

Tämän kappaleen tarkoituksena on käsitellä yleisesti tarkkaan vianpaikannukseen vaikuttavia paikannusmenetelmästä riippumattomia tekijöitä. Lähes kaikki tarkat vianpaikannusmenetelmät perustuvat vikakohdan etsimiseen vian läheisyydessä, joten saadun mittausdatan tulkitseminen on keskeisessä roolissa vianpaikannuksen nopeuden ja tarkkuuden maksimoimiseksi. Vianpaikannuksen suorittajien on osattava tulkita karkealla vianpaikannuksella määritettyä vikaa ja valita siihen sopiva tarkka vianpaikannusmenetelmä. Lisäksi vianpaikantajien on osattava käyttää kyseiseen tarkkaan vianpaikannusmenetelmään käytettävää mittalaitteistoa ja osattava tulkita siitä saatavaa mittausdataa. [24] Vianpaikantajalla tulisi olla riittävä ymmärrys vian tulkitsemiseen, vianpaikannusmenetelmiin ja vianpaikannuksen käytäntöihin. Vianpaikannuksen tehokkuutta voidaan parantaa säännöllisellä koulutuksella ja vianpaikannusharjoituksilla [5].

Vian sijainti vaikuttaa käytettävän tarkan vianpaikannusmenetelmän soveltamiseen. Merellä vianpaikannusmenetelmän soveltaminen riippuu merenpohjan rakenteesta, näkyvyydestä, kaapelin hautausvyvyydestä ja meren syvyydestä. Maalla vianpaikannukseen vaikuttaa kaapelin hautausvyvyys ja asennustapa. Vian sijainnin lähellä voi olla rakenteita tai häiriölähteitä, jotka hankaloittavat vian tarkkaa paikannusta. [25] Tarkan vianpaikannuksen nopeuteen ja onnistumiseen vaikuttaa myös kaapelireitin tunteminen, koska useat tarkat vianpaikannusmenetelmät toimivat parhaiten muutamien metrien päästä kaapelista. Kaapelireitiltä tahaton poikkeaminen vaikeuttaa kaapelivian paikantamista ja kasvattaa kaapelivian paikantamiseen kuluva aikaa, joka voi olla viankorjausprojektin kannalta suuri kustannusriski. [6, 25] Tämän vuoksi kaapelin tarkka vianpaikannus on hyvä suorittaa esimerkiksi kulkemalla kaapelin ylitse, jolloin varmistetaan kaapelireitillä pysyminen [4].

Tarkka vianpaikannus voi viivästyä monista eri tekijöistä johtuen. Vianpaikannusta suoritetaan harvoin johtuen kaapeleiden pienestä vikaantumistaajuudesta. Kuitenkin valmiustaso kaapelin vianpaikannukseen on oltava korkealla, jotta vianpaikannus voidaan suorittaa

taa nopeasti ja luotettavasti minimoiden vian aiheuttamat kustannusriskit. Valmiustason ylläpitämiseksi on järjestettävä vianpaikannusharjoituksia ja oltava kattava toimintaohjeistus vianpaikannukseen. Vianpaikannus voi viivästyä, jos vianpaikannuslaitteet eivät ole käyttövalmiita tai niiden ohjeistus ei ole kunnossa. [5] Kaapelivika voi sijaita alueella, jossa edellytetään erillinen lupa vianpaikannukselle, jolloin luvan hakeminen ja myöntäminen saattavat viivästyttää tarkan vianpaikannuksen suorittamista [41]. Lisäksi huonot sääolosuhteet voivat viivästyttää tarkan vianpaikannuksen suorittamista merellä [41].

Tarkkaan vianpaikannukseen tarvitaan yleensä kolmannen osapuolen henkilöitä ja laitteita kuten merellä vianpaikannukseen käytettävä vene ja ROV, jotta vianpaikannus voidaan suorittaa. Usein kaapelin omistajalla ei ole riittäviä laitteita vian paikantamiseen. Tällöin tarkan vianpaikannuksen nopeuteen vaikuttaa kaapelin omistajan ja palvelutarjoajan välillä tehdyt valmiussopimukset, joilla varmistetaan mahdollisimman nopea aloitus tarkalle vianpaikannukselle. [5]

Karkean vianpaikannuksen yhteydessä määritetty kaapelivikatyyppi ja tutkittavan vika-alueen laajuus ja sijainti vaikuttavat tarkan vianpaikannusmenetelmän valintaan ja vianpaikannuksen onnistumiseen [36]. Karkeassa vianpaikannuksessa käytetyt menetelmät rajoittavat joidenkin tarkkojen vianpaikannusmenetelmien käyttöä. Kaapelivian polttaminen pieniresistanssiseksi rajoittaa esimerkiksi akustisen menetelmän käyttämistä, jolloin tarkka vianpaikannus on mahdollisesti suoritettava jollain muulla menetelmällä. [42]

## 5. SUURJÄNNITTEISEN TASASÄHKÖKAAPELIN MAGNEETTIKENTÄN MUODOSTUMINEN JA MITTAAMINEN

Tässä luvussa käsitellään magneettikenttien muodostumista kaapeleissa ja magneettikentän mittaamista. Kaapelin synnyttämä ulkoinen magneettikenttä riippuu kaapelin kuormitusvirrasta ja havainnointipisteen etäisyydestä kaapelista. Kaapelin synnyttämä ulkoinen magneettikenttä on eri suuruinen kaapelivian molemmiin puolin, mistä pystytään päättelemään kaapelivian sijainti. Tämän vuoksi kaapelivian mittauksen suorittaminen sekä mitaushäiriöiden tunnistaminen ja minimointi on vianpaikannuksen onnistumisen kannalta oleellinen asia. Luvussa käydään läpi fluxgate-magnetometrin toimintaperiaate, koska tässä työssä käytettävä magneettikentän mittalaitteisto käyttää tämän tyyppistä sensoria. Luvun viimeisessä kappaleessa esitellään magneettikentän mittaamisessa käytettäviä laitteita.

### 5.1 Magneettikentän muodostuminen tasasähkökaapelissa

Kaapelin johtimessa kulkeva tasavirta synnyttää staattisen magneettikentän kaapelin ympäristöön, jolloin magneettikentän vuo ei muutu ajan funktiona [60]. Kaapelin muodostama magneettikenttä voidaan laskea Ampéren lain avulla, jonka mukaan suljetun silmukan läpi kulkeva virta aiheuttaa magneettikentän kaavan (5.1) mukaisesti

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{\text{encl}} \quad (5.1)$$

jossa  $\mathbf{B}$  on magneettivuon tiheys,  $d\mathbf{l}$  on integrointitie,  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  (H/m) on tyhjiön permeabiliteetti ja  $I_{\text{encl}}$  on integroitavan tien sisään jäävien virtojen summa [60]. Magneettikentän voimakkuuden tunnus on  $\mathbf{H}$ , mutta suuruuden osoittamisessa on mielekkäämpää käyttää magneettivuon tiheyttä. Magneettikentän voimakkuus on vektorisuure ja ääretömän pitkän suoran johtimen tapauksessa magneettikentän suunta voidaan päätellä oikean käden säännöstä, jossa peukalo osoittaa virran suuntaan johtimessa ja sormet kiertyvät johtimen ympärille magneettikentän suuntaisesti [61]. Permeabiliteetti kuvaa aineen käyttäytymistä magneettikentässä, ja sitä käsitellään tarkemmin fluxgate-magnetometriä käsittelevässä kappaleessa 5.4.

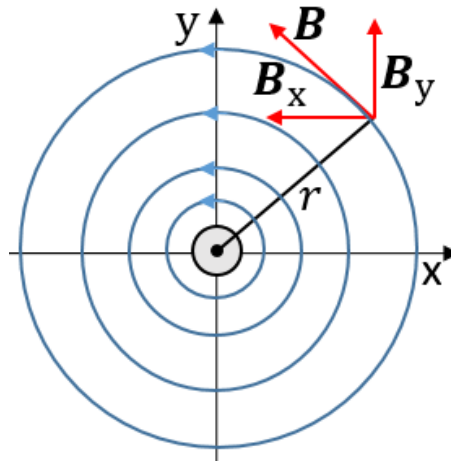
Kaapelin muodostaman magneettivuon tiheyden voimakkuus on riippuvainen kaapelissa kulkevasta virrasta sekä tarkastelupisteen ja johtimen välisestä etäisyydestä. Lisäksi kaapelin ja tasasähköyhteyden rakenne vaikuttavat magneettikentän voimakkuuteen. [76] Tasasuunnattu vaihtovirta ei ole täysin puhdasta tasavirtaa, vaan kaapelissa kulkeva virta sisältää harmonisia yliaaltoja, jotka riippuvat käytetystä suuntaajateknologiasta [8]. Harmonisia yliaaltoja voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi käytössä olevan kaapelin paikanuksessa [43]. Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan tarkemmin yksijohdin- ja koaksiaalikaapeleissa syntyviä magneettikenttiä ja virta oletetaan puhtaaksi tasavirraksi.

### 5.1.1 Yksijohdinkaapeli

Yksijohdinkaapelin magneettivuon tiheyden suuruus tietyssä pisteessä kaapelin ulkopuolella voidaan johtaa Ampéren laista. Yksijohdinkaapelin muodostama magneettikenttä voidaan laskea Biot-Savartin laista (5.2)

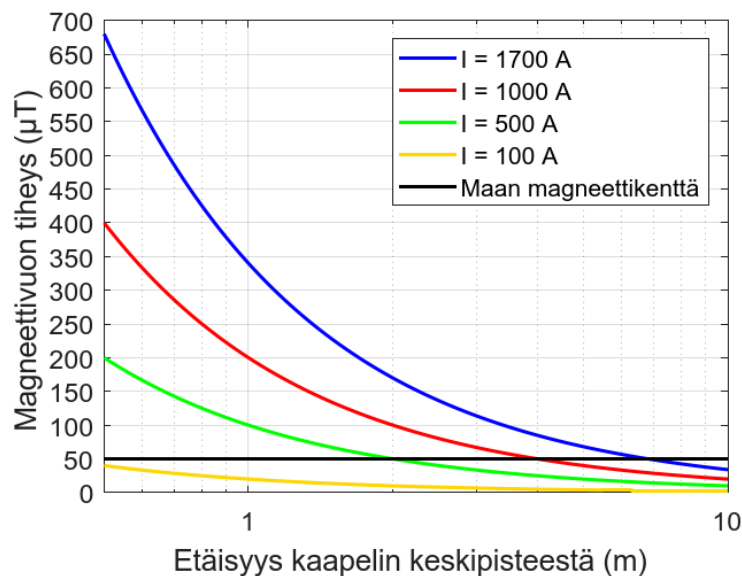
$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r} \quad (5.2)$$

jossa  $\mu_r$  on suhteellinen permeabiliteetti,  $I$  on johtimessa kulkeva virta ja  $r$  on etäisyys johtimen keskipisteestä. Kaavaa (5.2) voidaan soveltaa vain äärettömän pitkille suorille johtimelle, jossa virran suuruus ei muutu johtimen eri osissa. Todellisuudessa johtimen virta ei ole vakio kaapelin varrella johtuen esimerkiksi kaapelin eristeen vuotovirtojen vaihtelusta kaapelin varrella. [60] Yleisten johdinmateriaalien, kuparin ja alumiinin, suhteellinen permeabiliteetti on noin yksi, joten sitä ei tarvitse huomioida laskennassa [59]. Syntynyt magneettikenttä on suoraan verrannollinen kaapelin johtimessa kulkevaan virtaan ja kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön. Kuvassa 5.1 on esitetty yksijohdinkaapeli  $xy$ -koordinaatistossa äärettömän pitkän suoran johtimen tapauksessa, missä kaapeli sijaitsee  $z$ -akselin suuntaisesti ja virran suunta on katsojaa kohti. Kokonaismagneettikenttä mielivaltaisessa pisteessä muodostuu  $x$ - ja  $y$ -suuntaisista komponenteista. Magneettivuon tiheyttä kuvataan viivojen tiheydellä siten, että lähellä kaapelia viivoja on tiheämmin, koska magneettivuon tiheys on siellä suurempi. [62]



**Kuva 5.1.** Yksijohdinkaapeli z-akselin suuntaisesti xy-koordinaatistossa, jossa virran suunta on katsojaa kohti. Lisäksi kuvassa on esitetty magneettivuon tiheyden komponentit  $B_x$  ja  $B_y$  sekä magneettivuon tiheyden kokonaisarvo  $B$  mielivaltaisessa pisteessä etäisyydellä  $r$ .

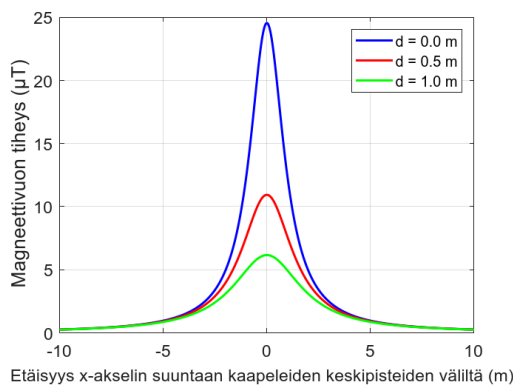
Kuvassa 5.2 on esitetty yksijohdinkaapelin muodostama laskennallinen magneettivuon tiheys etäisyyden funktiona kaapelin keskipisteestä eri kuormitusvirroilla, kun kaapeli sijaitsee kuvan 5.1 mukaisessa tilanteessa. Lisäksi kuvassa 5.2 on esitetty maapallolla vaikuttava staattinen magneettikenttä, joka on Suomessa noin  $50 \mu\text{T}$  [63]. Esimerkiksi, kun kaapelin kuormitusvirta on  $1000 \text{ A}$  ja etäisyys  $1 \text{ m}$  kaapelin keskipisteestä, magneettivuon tiheys on  $200 \mu\text{T}$ . Kuvasta 5.2 voidaan myös huomata, että kaapelin magneettivuon tiheyden voimakkuus pienenee voimakkaasti etäisyyden kasvaessa kuormitusvirran pysyessä vakiona ja etäisyyden kaksinkertaistuminen puolittaa magneettivuon tiheyden arvon. Vastaavasti kuormitusvirran puoliintuminen puolittaa magneettivuon tiheyden arvon, kun etäisyys pysyy vakiona.



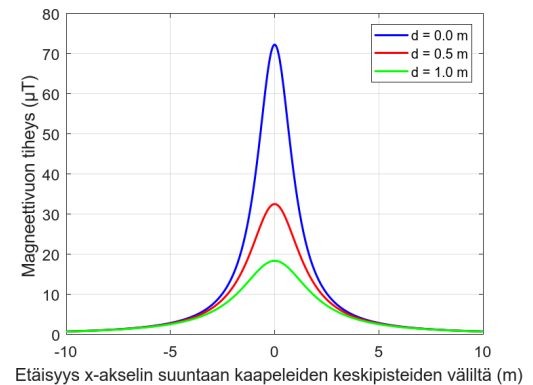
**Kuva 5.2.** Yksijohdinkaapelin muodostama laskennallinen magneettivuon tiheys etäisyyden funktiona johtimen keskipisteestä eri kuormitusvirroilla. Lisäksi kuvassa on esitetty maan magneettivuon tiheys Suomessa.

Rinnakkain sijaitsevien kaapeleiden muodostama kokonaismagneettikenttä on riippuvainen kuormitusvirtojen suunnasta, jolloin kokonaismagneettikenttä voi joko vahvistua tai heikentyä [58]. Yksijohdinkaapelipareissa meno- ja paluupiirin vastakkaisten virtojen synnyttämät magneettikentät kumoavat osittain toisensa oikean käden säännön mukaisesti, minkä vaikutuksesta magneettikenttä heikkenee entistä nopeammin etäisyyden kasvaessa. [24, 59] Kaapeleiden tuottama kokonaismagneettikenttä riippuu johtimien kuormitusvirtojen ja mittauspisteen etäisyyden lisäksi kaapeleiden ulkokehien välisestä etäisyydestä [59].

Kuvassa 5.3 on esitetty EstLink 1 -meri- ja maakaapeleiden laskennallinen magneettivuon tiheys eri mittauspisteiden etäisyyksillä  $d$  maantasosta  $x$ -suuntaisen etäisyyden funktiona. Kaapelit sijaitsevat koordinaatistosta kuten kuvassa 5.1, mutta ovat haudattuina metrin syvyyteen ja kaapeleiden keskipisteet sijaitsevat  $a$  etäisyydellä toisistaan. Johtimien kuormitusvirtana on käytetty 1230 A ja virrat kulkevat vastakkaisiin suuntiin. Kaapeleiden keskipisteiden välinen etäisyys  $a$  on merikaapeleilla 0,1 m ja maakaapeleilla 0,3 m. Havainnointipisteen muuttuminen korkeussuunnassa pienentää huomattavasti havaittavaa kaapelin muodostamaa magneettivuon tiheyttä, kuten kuvista 5.3(a) ja 5.3(b) voidaan huomata. Tämän vuoksi mittalaite on saatava yleisesti hyvin lähelle kaapelia ja etäisyys on pystyttävä pitämään vakiona, jotta saadaan mahdollisimman luotettava paikannustulos. Kuvasta 5.3 huomataan myös, että magneettivuon tiheyden suuruus on riippuvainen kaapeleiden keskipisteiden välisestä etäisyydestä. Tämän vuoksi maakaapeleiden muodostama magneettivuon tiheys on suurempi kuin merikaapeleilla, koska magneettikentät kumoavat vähemmän toisiaan.



(a)



(b)

**Kuva 5.3.** Yksijohdinkaapeliparin laskennallinen magneettivuon tiheys  $x$ -akselin etäisyyden funktiona eri mittauspisteiden etäisyyksillä  $d$  maantasosta a) EstLink 1 -merikaapelilla b) EstLink 1 -maakaapelilla. Johtimien kuormitusvirta on 1230 A vastakkaisiin suuntiin, molempien kaapeleiden hautausvyvyys  $h = 1,0$  m ja kaapeleiden keskipisteiden välinen etäisyys on merikaapelilla  $a = 0,1$  m ja maakaapeleilla  $a = 0,3$  m.

Kuvista 5.2 ja 5.3 voidaan huomata, että yksijohdinkaapeliparin muodostama kokonaismagneettivuon tiheys on huomattavasti pienempi kuin yhdellä yksijohdinkaapelilla sa-

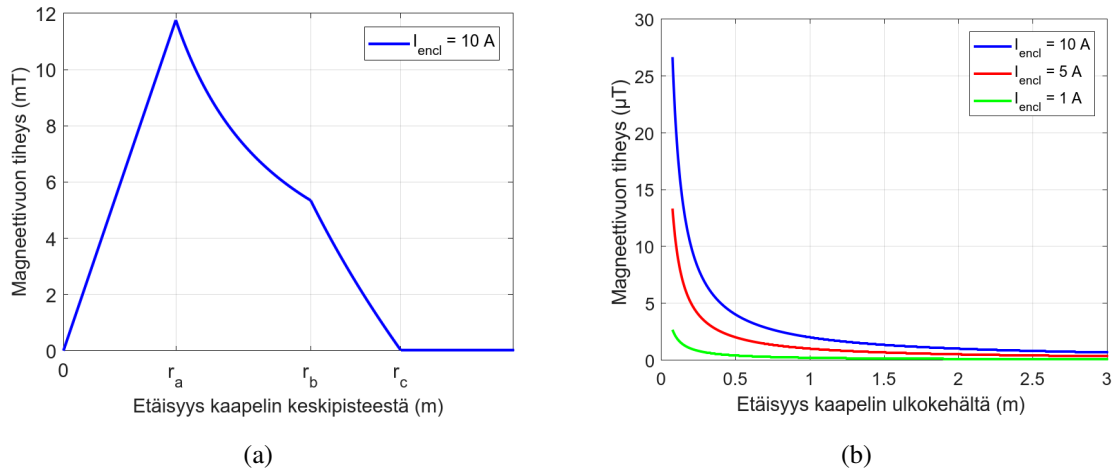
malla tarkastelupisteen etäisyydeltä johtuen magneettikenttien kumoutumisesta. Samoin yksijohdinkaapeliparin kokonaismagneettikenttä heikentyy nopeammin etäisyyden kasvaessa kuin yhdellä yksijohdinkaapelilla. Esimerkiksi kuvassa 5.3(a) etäisyyden kaksinkertaistuminen pudottaa magneettivuontiheyden lähes viidesosaan, kun taas kuvassa 5.2 etäisyyden kaksinkertaistuminen puolittaa magneettivuon tiheyden. Kaapeleiden keskipisteiden välinen etäisyys vaikuttaa syntyneeseen kokonaismagneettikenttään, joka voidaan myös huomata kuvasta 5.3. vertaamalla meri- ja maakaapelin kokonaismagneettikenttiä. Työn mittaukset suoritetaan käytössä olevista yhteyksistä, minkä vuoksi kaapeliparien muodostama magneettikenttä on oleellista käsitellä. [59]

Kaapelin hautaaminen merenpohjaan tai maahan ei vaikuta magneettikentän havaittavuuteen muutoin kuin etäisyyden osalta, koska merenpohjan, maaperän ja meriveden suhteellinen permeabiliteetti on noin yksi [64]. Kaapelin kuormitusvirta määrittää magneettivuon tiheyden tietyllä etäisyydellä, joten esimerkiksi johtimen poikkipinta-alalla ei ole merkitystä magneettikentän voimakkuuteen [65].

### 5.1.2 Koaksiaalikaapeli

Koaksiaalikaapelin muodostama ulkoinen magneettikenttä on riippuvainen johtimessa ja paluujohtimessa kulkevista virroista. Koaksiaalikaapelissa johtimet ovat mahdollisimman symmetrisesti toisiinsa nähden, mistä johtuen yksijohdinkaapeliparien yhteydessä esitetty magneettikenttien kumoutuminen on lähes täydellistä [66]. Koaksiaalikaapelin muodostama ulkoinen magneettikenttä on nolla Ampéren lain mukaisesti, jos johtimien virrat ovat yhtä suuret. Tällöin integrointitien sisään jäävien virtojen summa on nolla, jolloin kaapeli ei muodosta ulkoista magneettikenttää. [67] Käytännössä HVDC-yhteyksillä kuitenkin osa virrasta palaa maata tai merta pitkin, jolloin meno- ja paluupiirin virroissa on pientä eroa [34]. Fingridin käytönvalvontajärjestelmän mittaustietojen mukaan EstLink 2 -kaapelin johtimien virtojen erot ovat olleet noin 1–10 A välillä, jolloin käytännössä kaapeli muodostaa ulkoisen magneettikentän [68].

Kuvassa 5.4(a) on esitetty EstLink 2 -koaksiaalikaapelin muodostama laskennallinen magneettivuon tiheys kaapelin sisällä ja ulkopuolella, kun pääjohtimen virta on 1470 A ja paluujohtimien virta 1460 A. Kuvassa 5.4(a) etäisyys  $r_a = 0,025$  m on pääjohtimen säde,  $r_b = 0,055$  m on etäisyys kaapelin keskipisteestä paluujohtimeen ja  $r_c = 0,075$  m on kaapelin ulkosäde. Kuvassa 5.4(b) on tarkasteltu kaapelin muodostamaa laskennallista ulkoista magneettivuon tiheyttä etäisyydestä  $r_c$  eteenpäin eri erovirroilla. Kuten kuvista nähdään, muodostunut magneettikenttä on hyvin pieni kaapelin ulkopuolella ja on riippuvainen erovirran suuruudesta.



**Kuva 5.4.** Koaksiaalikaapelin laskennallinen magneettivuon tiheys a) kaapelin sisällä, kun pääjohtimen virta = 1470A ja paluujohtimen virta = 1460 A b) kaapelin ulkokehältä, kun pää- ja paluujohtimen erovirta  $I_{\text{encl}} = 1 \text{ A}$ ,  $I_{\text{encl}} = 5 \text{ A}$  ja  $I_{\text{encl}} = 10 \text{ A}$ .

Muodostunut magneettikenttä on  $2 \mu\text{T}$  yhden metrin etäisyydellä kaapelin keskipisteestä, kun erovirta on 10A. Kymmenen kertaa pienemmällä erovirralla muodostunut magneettikenttä on vain  $0,2 \mu\text{T}$ , joka on jo hyvin vaikeaa erottaa maan magneettikentästä. Koaksiaalikaapelin muodostamaa laskennallista magneettikenttää voidaan verrata vianpaikannuksen aikana muodostuneeseen magneettikenttään, koska koaksiaalikaapelin erovirta ja kaapeliin vikatilanteessa syötettävä virta ovat samaa suuruusluokkaa. Mittalaitteen etäisyydellä kaapeliin on erittäin suuri vaikutus mitattavaan magneettikenttään, koska muodostunut magneettikenttä on hyvin pieni. [4, 46]

## 5.2 Magneettikentän muutoksen havaittavuus kaapelivian ympäristössä

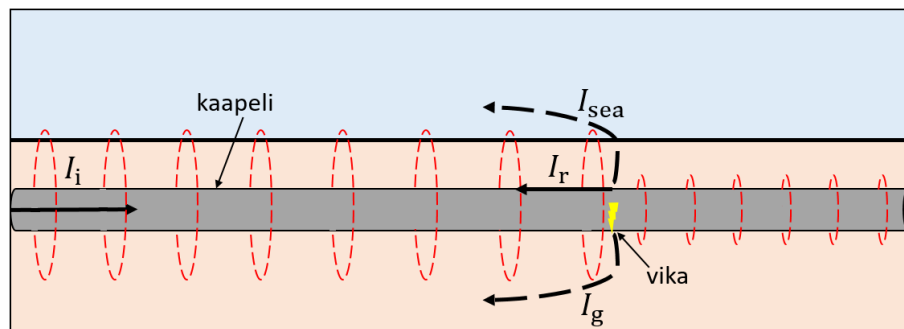
Jotta kaapelivian voi luotettavasti paikantaa magneettikenttää mittaamalla, on tärkeää ymmärtää, mitkä asiat vaikuttavat magneettikentän muutoksen havaittavuuteen vikakohdan ympäristössä. Tällaisia tekijöitä ovat vikapaikassa tapahtuva virranjako, kaapeliin syötettävä virta, käytettävä mittalaite ja ulkoiset häiriölähteet. [43]

Kaapelin vikatyypin vaikuttaa magneettikentän muutoksen havaitsemiseen kaapelivian kohdalla. Kuvassa 5.5. on havainnollistettu virtojen jakautumista merenpohjaan haudatuskaapelissa, johon syötetään ulkoisesta teholahteesta virta  $I_i$  ja vikakohdasta palaavat virrat  $I_r$ ,  $I_{\text{sea}}$  ja  $I_g$ . Vikakohdassa tapahtuu virranjako Kirchhoffin virtalain mukaisesti, jolloin osa johtimeen syötetystä virrasta kulkee vikaresistanssin kautta ja palaa takaisin maaperän, meren tai kaapelin metallisia rakenteita pitkin. Vian paikantaminen magneettikenttää mittaamalla onnistuu vain, jos johtimeen syötettävä virta palaa osittain maaperän tai meren kautta takaisin, jolloin  $I_i \neq I_r$ , kuten kappaleessa 5.1.2 käsitellyn koaksiaalikaapelin tapauksessa. Ennen kaapelivikaa magneettikenttä pysyy lähes vakiona, mutta vian



jälkeen magneettikenttä pienenee, koska virta pienenee. Virranjako synnyttää eron ulkoiseen magneettikenttään kaapelin vikakohtan molemmille puolille, joka voidaan havaita magneettivuon tiheyden muutoksena vikapaikasta eteenpäin. [4, 24, 71]

Vikakohdassa ei havaita magneettivuon tiheyden muutosta, jos johtimeen syötettävä virta palaa takaisin kokonaan kaapelin metallisia rakenteita pitkin, koska tällöin kaapeli toimii kuten koaksiaalikaapeli ja ulkoista magneettikenttää ei synny [67]. Käytännössä maaperä ja meri tarjoavat virralle kaapelin metallisia rakenteita pieniresistanssisemmän kulkureitin, jolloin magneettivuon tiheyden muutos voidaan teoriassa havaita [4].



**Kuva 5.5.** Kaapeliin syötettävä virta  $I_i$  ja paluuvirrat  $I_r$ ,  $I_g$  ja  $I_{sea}$  vikatilanteessa, perustuu lähteeseen [43].

Kaapelin muodostama magneettikenttä aiheuttaa poikkeaman maan magneettikenttään kaapelin ympäristössä, minkä avulla kaapeli pystytään erottamaan maan magneettikentästä. Kaapelin magneettikentän muutoksen havaittavuutta vaikeuttaa sen erottaminen maan magneettikentästä. [69] Vikaantuneeseen kaapeliin syötettävä virta on muutamista ampeereista kymmeneen ampeereihin [4, 43], jolloin kaapelin muodostama magneettikenttä on huomattavasti pienempi kuin maan magneettikenttä, mikä voidaan huomata vertailemalla kuvia 5.2 ja 5.4(b). Tämän vuoksi vikaantuneeseen kaapeliin ei kannata syöttää tasavirtaa, koska muutoksen havaitseminen olisi hyvin hankalaa. Muutoksen havaitseminen helpottuu, jos kaapeliin syötettävä virta on tietyn taajuuden omaavaa jatkuva-aikaista vaihtovirtaa [43]. Sopivan signaalin valintaa käsitellään tarkemmin kappaleessa 5.3.1.

Suuriresistanssisen rinnakkaisvian tai pieniresistanssisen sarjavian aiheuttaman magneettikentän muutoksen erottaminen kaapelista voi olla vaikeaa, koska suurin osa kaapeliin syötetystä virrasta kulkee vikapaikan jälkeenkin kaapelin johdinta pitkin pienempiresistanssisen kulkutien vuoksi, jolloin magneettikentän muutos on todella pieni ja siten vaikeasti havaittavissa [4, 46]. Kaapelivian paikantaminen voi olla myös hankalaa kaapeleissa, jossa metallinen vaippa on maadoitettu monesta kohtaa kaapelin armeeraukseen. Tällöin magneettikentän muutos havaitaan myös maadoitusten ympäristössä, jolloin vian paikantaminen vaikeutuu. [51]

Magneettikentän muutos vikakohdassa havaitaan sitä paremmin mitä lähempänä mittalaitte on kaapelia. Lisäksi mittalaitteen etäisyys kaapelista tulee olla mahdollisimman vakio

vianpaikannuksen aikana, koska etäisyyden vaihtelu voi aiheuttaa suuria eroja havaittuun magneettikenttään, mikä näkyy mittaustuloksissa vikapaikan tavoin. Kaapelin ja mittalaitteen väliset etäisyys erot hankaloittavat vianpaikannustuloksen tulkitsemista tapauksissa, jossa magneettikentän muutos vian ympäristössä on pieni. [46]

### 5.3 Kaapelin magneettikentän mittaaminen

Kaapelin magneettikenttää voidaan mitata magnetometrillä eli magneettisella sensorilla, joka mittaa magneettikentän suuntaa, voimakkuutta tai magneettikentän muutosta. Magnetometrit jaetaan mittaustavan mukaan skalaarimagnetometreihin, jotka mittaavat kokonaismagneettikenttää ja vektorimagnetometreihin, jotka mittaavat magneettikentän voimakkuutta ja suuntaa. [77] Kompassi on yksinkertainen esimerkki magnetometrillä, joka mittaa magneettikentän suuntaa, mutta ei voimakkuutta.

Magneettivuon tiheyden kokonaisarvo  $B$  muodostuu x-, y- ja z-suuntaisista magneettivuon tiheyden komponenteista ja se voidaan laskea kaavasta (5.3)

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (5.3)$$

jossa  $B_x$  on x-suuntainen,  $B_y$  on y-suuntainen ja  $B_z$  on z-suuntainen magneettivuon tiheys. Magnetometrit voivat olla yksi- tai kolmeakselisiä, jolloin mittapää muodostuu yhdestä tai kolmesta sensorista. Magneettikentän mittaukseen perustuvassa menetelmässä kaapelin muodostama magneettikenttä vaihtelee ajallisesti, jolloin yksi- ja kolmeakselisellä magnetometrillä mitatut magneettikentän kokonaisarvot poikkeavat toisistaan, koska yksiakselisellä magnetometrillä kaikkien koordinaattisuuntien mittaukset eivät ole samanaikaisia [66]. Kolmeakselinen magnetometri voi olla isotrooppinen, jolloin sensorin mittaama kokonaiskenttä on riippumaton magnetometrin asennosta magneettikenttään nähden. Isotrooppisissa magnetometreissä mittauselementit on asetettu kohtisuoraan toisiinsa nähden. [70]

Kaapelin magneettikentän mittaamiseen ja kaapelivian magneettikentän muutoksen havaitsemiseen vaaditaan magnetometri, jolla voidaan mitata tarkasti staattisia ja pienitajuja magneettikenttiä. Suuriresistanssisessa rinnakkaisviassa magneettikentän muutos vikapaikan ympäristössä on pieni, jolloin magnetometrin tulee voida havaita myös pienet muutokset magneettikentässä. [71] Magnetometrin tulee olla myös tarpeeksi pieni, jolloin se itsessään vaikuttaa mahdollisimman vähän mittaustulokseen [70].

Kaapelin paikannuksessa tai vianpaikannuksessa on usein hyvä tietää magneettikentän suunta voimakkuuden lisäksi, jolloin voidaan päätellä kaapelin sijainti magnetometriin nähden. Tämän vuoksi vektorimagnetometrit soveltuvat skalaarimagnetometrejä parem-

min kaapelin paikannukseen ja vianpaikannukseen. [71] Vektorimagnetometrejä on useita erilaisia, mutta yleisimpiä vektorimagnetometrejä ovat induktiokela, fluxgate-magnetometri ja Hall-anturi [77].

Staattisen tai pienitaajuuden magneettikentän mittaaminen perustuu useimmiten magneettiseen induktioon, jolloin suljetussa silmukassa tapahtuva magneettivuon muutos indusoi silmukkaan jännitteen, joka riippuu lineaarisesti magneettivuon muutoksen suuruudesta. Suljetussa silmukassa tapahtuu magneettivuon muutos, jos kaapelin magneettikenttä vaihtelee ajallisesti tai mittalaitetta liikutetaan kaapelin synnyttämässä magneettikentässä. [77]

Magneettikentän mittaaminen voi perustua muihinkin ilmiöihin kuin induktioon, mutta tässä työssä käsitellään vain induktioon perustuvaa fluxgate-magnetometriä. Magneettinen induktio tunnetaan myös Faradayn lakina ja se voidaan laskea kaavasta (5.4)

$$V_{\text{ind}} = -N \frac{d\phi}{dt} = -NA \frac{dB}{dt} \quad (5.4)$$

jossa  $N$  on käämikierrosten lukumäärä,  $V_{\text{ind}}$  on indusoitunut jännite,  $\frac{d\phi}{dt}$  on magneettivuon aikaderivaatta,  $A$  on silmukan pinta-ala ja  $\frac{dB}{dt}$  on magneettivuon tiheyden aikaderivaatta. [66] Lenzin lain mukaisesti indusoituneesta jännitteestä syntynyt virta pyrkii vastustamaan magneettivuon muutosta, mistä johtuen Faradayn lain jännitteellä on negatiivinen etumerkki. Seuraavissa kappaleissa käsitellään magneettikentän mittaamista kaapelivian aikana, siihen liittyviä häiriöitä ja niiden minimoimista.

### 5.3.1 Mittauksen suorittaminen kaapelivian aikana

Kaapelin magneettikentän mittauksen suorittaminen riippuu tutkittavan vika-alueen sijainnista, kaapelin hautaussyvydestä, kaapelin tai kaapelin hautaamisjälkien näkyvyydestä, kaapelikoordinaattien tarkkuudesta, syötettävästä signaalista, käytettävien magnetometrien määrästä ja mahdollisista muista käytettävistä sensoreista. [43, 72]

Mittauksen suorittaminen edellyttää signaalin syöttämistä vioittuneeseen kaapeliin, mikä on merkittävä vaikutus mittaustulokseen. Jatkuva-aikaisen vaihtovirtasignaalin syöttäminen kaapeliin on yksi yleisimpiä lähestymistapoja kaapelin vianpaikannukseen magneettikentän mittaukseen perustuvassa menetelmässä [73], mutta kaapeliin voidaan syöttää myös pulssisignaalia, jonka pulssitaajuus on korkea [71]. Pulssisignaalin syöttäminen kaapeliin ei ole kuitenkaan kannattavaa, koska tällöin syötettävä signaali ei ole jatkuva-aikainen. Vaihtovirran amplitudin tulee olla riittävän suuri signaalin havaitsemiseen tietyllä etäisyydellä ja taajuuden riittävän pieni, jotta signaalin vaimentuminen minimoidaan kaapelipituuden kasvaessa. [4, 43]

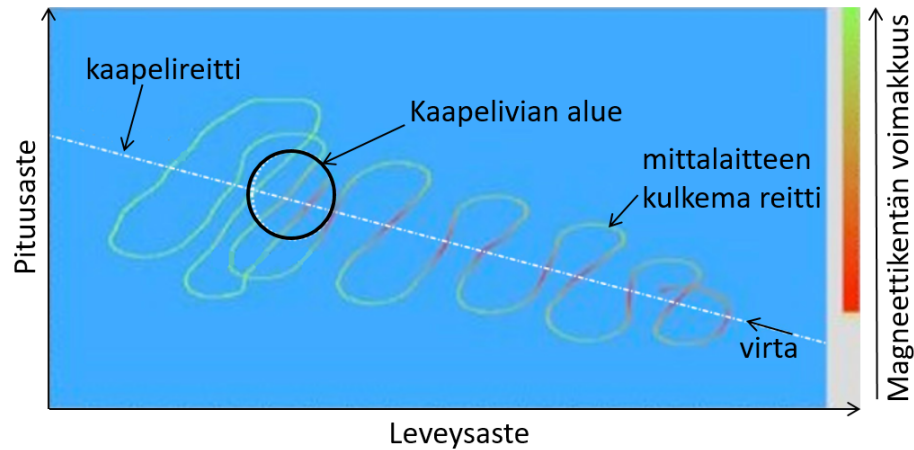
Signaalin vaimentuminen aiheutuu johtimessa tapahtuvista häviöistä sekä eristeen häviöistä ja vuotovirroista, jotka molemmat ovat riippuvaisia syötettävän signaalin taajuudesta [73]. Tasasähköllä virta jakautuu tasaisesti johtimen poikkipinta-alalle, mutta vaihtosähköllä virta ei jakaudu tasaisesti johtimessa, vaan kulkee johtimen pinnalla. Tätä ilmiötä kutsutaan virranahdoksi (engl. skin effect), jolloin johtimen efektiivinen poikkipinta-ala pienenee ja resistanssi kasvaa. Korkeammilla taajuuksilla virta kerääntyy enemmän johtimen pinnalle, minkä vuoksi signaali vaimenee enemmän. [24] Kaapelin kapasitiivinen reaktanssi riippuu suoraan syötettävän virran taajuudesta kaavan (5.5) mukaisesti

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (5.5)$$

jossa  $X_c$  on kaapelin kapasitiivinen reaktanssi,  $f$  on signaalin taajuus ja  $C$  on kaapelin kapasitanssi. Suuritaajuiset signaalit vaimenevat nopeammin kuin pienitaajuiset, koska suurilla taajuuksilla kapasitiivinen reaktanssi on pienempi kuin pienillä taajuuksilla. Pienempi kapasitiivinen reaktanssi vaimentaa signaalia enemmän, koska kaapelin kapasitiivnen eristerakenne varautuu enemmän ja siten varausvirta kasvaa. [74]

Pienitaajuisilla signaaleilla saavutetaan huonompi mittaustarkkuus kuin suurilla taajuuksilla, koska suurempi taajuus indusoi suuremman jännitteen magnetometriin samalla etäisyydellä ja virran amplitudilla. Tästä johtuen suurilla taajuuksilla magneettikentän muutos havaitaan helpommin kuin pienillä taajuuksilla. Signaalin taajuuden valinta on optimointitehtävä, missä tulee ottaa huomioon edellä mainitut asiat. Yleensä vikaantuneeseen pitkään kaapeliin syötettävän signaalin taajuus on 20–30 Hz välillä [73], mutta taajuuden valintaan vaikuttaa vian sijainti sekä mittalaitteen ja signaaligeneraattorin ominaisuudet. [4, 46]

Magneettikentän mittaaminen suoritetaan tyypillisesti kulkemalla "siksakkia" kaapelireittiä pitkin, kuten kuvassa 5.6 on esitetty mittalaitteen kulkema reitti, mikäli kaapelireittiä ei nähdä visuaalisesti. Tällaisella kulkureitillä ehkäistään kaapelireitiltä poikkeaminen ja siten mahdollinen vikapaikan ohittaminen erityisesti kun käytössä on vain yksi magnetometri. Lisäksi siksakilla ehkäistään kaapelikoordinaattien epätarkkuudesta aiheutuvaa haittaa vianpaikannukselle. Magneettikentän mittaaminen tehdään karkean vianpaikannuksen rajaamalle alueelle ja kulkusuunta on signaalia syötettävästä päästä pois päin. [4, 43]



**Kuva 5.6.** Kaapelivian magneettikentän mittauksen suorittaminen ja magneettikentän muodostuminen kaapelireitillä, jossa magneettikentän voimakkuus on suurimmillaan punaisella värillä. Perustuu lähteeseen [5].

Lähestyttäessä kaapelia sivusta päin magneettikentän voimakkuus kasvaa ja on korkeimmillaan kaapelin yläpuolella, jos mittalaitteen etäisyys kaapelista pysyy vakiona kuljetun reitin varrella. Magneettikentän voimakkuus laskee, kun kuljetaan pois päin kaapelista. Kaapelivika paikantuu alueelle, jossa kohtisuoraan kaapelin yläpuolella mitattavan magneettikentän voimakkuus on pienempi kuin edellisissä mittauspisteissä kohtisuoraan kaapelin yläpuolella. Magneettikentän voimakkuuden pienenemisen jälkeen paikannusta voidaan jatkaa takaisin tulosuuntaa kohti, millä pyritään varmistumaan kaapelivian sijainnista. [4, 43]

Magneettikentän mittaaminen voidaan myös suorittaa seuraamalla suoraan kaapelireittiä, jos käytössä on vain yksi magnetometri ja kaapeli tai kaapelin hautaamisesta jääneet jäljet ovat näkyvissä. Kaapelireittiä voidaan seurata suoraan myös haudatuilla kaapeleilla, jos käytössä on useampi kuin yksi magnetometri. [4, 43]

Merellä suoritettavassa mittauksessa jokainen magneettikentän mittausrarvo yhdistetään laivan sen hetkiseen GPS-sijaintiin (Global Positioning System), jolloin saadaan muodostettua mittalaitteen kulkeman reitin maantieteelliset koordinaatit leveys- ja pituusasteina. Magneettikentän mittausrarvon ja GPS-sijainnin yhdistämisessä voidaan käyttää esimerkiksi EIVA-ohjelmaa tai vastaavaa ohjelmaa. Maalla kaapelin paikantaminen voidaan suorittaa kulkemalla kaapelireittiä pitkin, jos kaapelireitillä on merkinnät kaapelin sijainnista. Maalla suoritettavassa mittauksessa GPS-sijainti voidaan ottaa esimerkiksi erillisestä GPS-paikantimesta, johon mittauspisteet yhdistetään. Mittalaitteen etäisyys kaapelista saadaan mitattua käyttämällä vähintään kahta magnetometriä. Tällä toimintatavalla saadaan vikapaikan koordinaatit, jolloin merellä viankorjausalus ja maalla viankorjaajat osaavat tulla oikeaan paikkaan. [71]

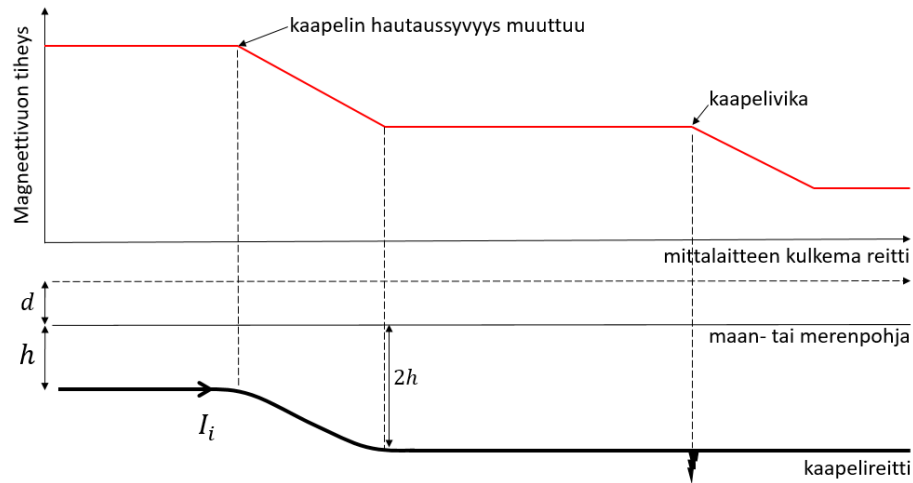
### 5.3.2 Häiriöt

Mittauksen suorittamiseen liittyy aina häiriöitä, joiden tunnistaminen on tärkeää kaapelivian havaitsemisen kannalta ja mahdollisimman tarkan vianpaikannustuloksen saavuttamisen vuoksi [43]. Heikkojen magneettikenttien mittaamiseen käytettävät magnetometrit ovat erittäin herkkiä ulkoisille häiriöille ja magneettivuon muutoksille [66]. Tämän vuoksi häiriöiden tunnistaminen on tärkeää, jotta magnetometriin kohdistuvat häiriöt voidaan minimoida tai jopa poistaa.

Kaapelin muodostamaan magneettikenttään voi aiheutua häiriöitä luonnossa esiintyvistä magneettikentistä. Maan magneettikenttä on suurimpia luonnossa esiintyviä häiriölähteitä kaapelin vianpaikannuksessa, koska maan magneettikenttä on huomattavasti voimakkaampi kuin esimerkiksi kaapeliin syötetyn virran muodostama magneettikenttä, jolloin kaapelin erottaminen maan magneettikentästä voi olla hankalaa. Lisäksi luonnossa esiintyviä häiriölähteitä ovat kaapelin läheisyydessä sijaitsevat ferromagneettiset esineet, jotka aiheuttavat poikkeamia maan magneettikenttään. Mittaushäiriöitä voi aiheutua myös ihmisen luomista magneettikentistä, kuten vaihtosähköllä toimivista laitteista ja vaihtosähköverkkoista, jotka aiheuttavat muuttuvan magneettikentän ympäristöön ja indusoivat siten jännitteen magnetometriin. [75]

Mittaushäiriöitä aiheuttaa myös magnetometrin etenemisnopeuden vaihtelu mittauksen aikana. ROV:n, sukeltajan, veneen ja maalla käytettävän kuljetusmenetelmän nopeuden vaihtelu vaikuttaa suoraan magnetometriin indusoituneeseen jännitteeseen kuten kaavasta (5.4) voidaan huomata. Suurempi nopeus kasvattaa magneettivuon tiheyden aikaderivaattaa, koska mittalaite läpäisee magneettivuon nopeammin, jolloin indusoitunut jännite on suurempi. Lisäksi magnetometrin ja kaapelin välisen etäisyyden vaihtelu aiheuttaa ylimääräisiä muutoksia mitattavaan magneettikenttään. Etäisyyden vaihtelu voi johtua mittalaitteen ja maanpinnan tai merenpohjan välisen etäisyyden vaihtelusta sekä kaapelin hautausvyöden vaihtelusta. [46]

Kuvassa 5.7 on esitetty esimerkki tilanne, jossa magnetometrin etäisyys  $d$  maan- tai merenpohjasta pysyy vakiona, mutta kaapelin hautausvyöden  $h$  kaksinkertaistuu ennen kaapelivikaa, kun kuljetaan kaapelireittiä pitkin. Tällöin kaapelivika voidaan paikantaa väärälle alueelle, koska mittaustuloksessa havaitaan vikapaikkaa vastaava magneettikentän muutos. Hautausvyöden muutoksesta aiheutuva mahdollinen väärä paikannustulos on kuitenkin mahdollista välttää, jos on tiedossa kaapelin tarkat hautausvyödet kaapelireitin varrelta tai käytössä on kaksi magnetometriä. Lisäksi hautausvyöden muutoksen aiheuttamaa riskiä voidaan pienentää jatkamalla vianpaikannusta pidemmälle ja seurata magneettikentän voimakkuuden muutosta. [46]



**Kuva 5.7.** Haudausvyvyyden vaihtelun vaikutus vianpaikannukseen, perustuu lähteeseen [43].

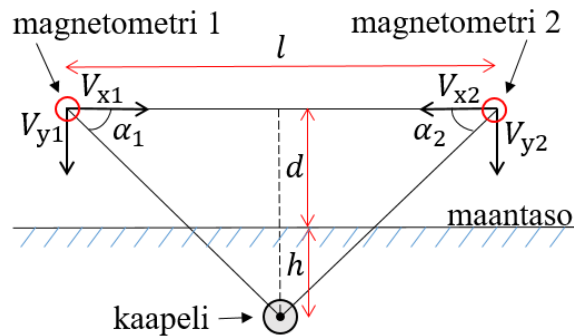
Magneettikentän mittaustulos riippuu edellä mainittujen tekijöiden lisäksi käytettävästä mittalaitteesta ja siihen liittyvästä mittavirheistä. Eri mittalaitteilla on erilaiset ominaisuudet, jotka vaikuttavat mittauksen tarkkuuteen. Näitä ominaisuuksia ovat sensorin mittausalue, kaistanleveys, taajuusvaste ja mittaustarkkuus [66]. Mittausalue määrittää, minkä suuruisia magneettikenttiä mittalaitteella pystytään mittaamaan. Kaistanleveydellä tarkoitetaan taajuusaluetta, jota mittalaitteella pystytään mittaamaan. Kaapelivian yhteydessä syötettävän vaihtovirtasignaalin taajuus tulee valita magnetometrin kaistanleveydelle sopivaksi. Mittalaitteen taajuusvaste kuvaa miten ulostulosignaali muuttuu sisään syötettävästä signaalista eri taajuuksilla. Tietyillä taajuuksilla mittalaite alkaa vääristämään saatua ulostulosignaalia, minkä vuoksi mittalaitteen taajuusvaste on tärkeä tuntee. Mittaustarkkuuteen vaikuttaa edellä mainittujen lisäksi sensorin sisäinen kohina. [46]

### 5.3.3 Häiriöiden vaikutusten minimointi

Häiriöt voidaan joko poistaa tai niiden aiheuttama vaikutus mittaustulokseen voidaan minimoida. Magneettikentän mittauksessa magnetometrin lähellä olevat magneettiset materiaalit tulee poistaa ja käyttää ei-magneettisia materiaaleja. ROV tai vianpaikannuksessa käytettävä alus aiheuttavat yleensä häiriöitä mittaukseen, jolloin magnetometri tulee sijoittaa ei-magneettiseen kehikkoon vähintään 1–2 metrin päähän ROV:sta tai käytettävästä aluksesta. [4, 43, 72]

Häiriölähteitä ei voida aina poistaa, jolloin niiden vaikutus tulee minimoida. Kaapelin haudausvyvyyden vaihtelun aiheuttamat mittaushäiriöt voidaan minimoida käyttämällä vähintään kahta magnetometriä, tai jos tiedetään kaapelin tarkat haudausvyvydet kaapelireitiltä. Kuvassa 5.8 on esitetty kolmiomittauksen periaatekuva, jossa kahdella magnetometrillä pystytään mittaamaan kaapelin haudausvyvyys, joka voidaan laskea liitteen A mukaisesti. Kolmiomittaus perustuu kahden magnetometrin tunnettuihin pisteisiin ja kaapelin tuntemattomaan pisteen muodostamaan kolmioon. Tunnettujen pisteiden välises-

tä etäisyydestä  $l$  sekä magnetometrien tunnetuista kulmista  $\alpha_1$  ja  $\alpha_2$  kaapeliin, voidaan laskea trigonometrian avulla etäisyys  $d+h$ , joka kertoo kaapelin ja magnetometrin välisen etäisyyden. Kulmat  $\alpha_1$  ja  $\alpha_2$  saadaan laskettua magnetometriin indusoituneista x-suuntaisista jännitteistä  $V_{x1}$  ja  $V_{x2}$  sekä y-suuntaisista  $V_{y1}$  ja  $V_{y2}$  jännitteistä. Kolmiomittauksen avulla etäisyys pystytään pitämään mahdollisimman vakiona vianpaikannuksen aikana ja hautausyvyuden vaihtelusta johtuvat erot voidaan paremmin ottaa huomioon mittaustuloksessa. Magnetometriin etäisyydellä toisistaan voidaan vaikuttaa kolmiomittauksen tarkkuuteen. Suurempi etäisyys parantaa mittaustarkkuutta, mutta vaikeuttaa etenemistä vedessä. [43, 72].



**Kuva 5.8.** Kolmiomittauksen periaate kaapelin hautausyvyuden määrittämisessä, jossa kaapeli sijaitsee z-akselin suuntaisesti. Perustuu lähteeseen [72].

Merellä vedenpinnan yläpuolelta suoritettavassa mittauksessa aallot aiheuttavat mittaustulokseen häiriöitä [4]. Lisäksi mittaushäiriöitä voidaan minimoida pitämällä magnetometrin nopeus mahdollisimman vakiona kaapelireitin varrella, jolloin nopeuden muutoksen aiheuttama vaihtelu vaikuttaisi mahdollisimman vähän indusoituneeseen jännitteeseen [71].

Magnetometriin indusoitunut jännite voidaan esittää jännitteen taajuusspektrinä, josta nähdään eri taajuuksien indusoimat jännitteet. Taajuusspektrin avulla laitteisto voidaan kalibroida suodattamalla pois muista kuin kaapeliin syötettävästä taajuudesta indusoituneet jännitteet käyttämällä sopivia suodattimia. ROV:n tai aluksen aiheuttama taustakohina saadaan suodatettua kalibroimalla mittalaitteisto riittävän kaukana kaapelista. Ylipäästösuodattimella voidaan suodattaa matalat taajuudet kuten maan magneettikenttä, koska kaapelin magneettikentän erottaminen maan magneettikentästä on hyvin hankalaa. ROV tai merellä käytettävä alus käyttävät todennäköisesti 50 tai 60 Hz taajuudella toimivia järjestelmiä, jolloin niistä indusoituneet jännitteet on hyvä suodattaa. Lisäksi mittalaitteen kaistanleveyden ulkopuoliset taajuudet voidaan suodattaa alipäästösuodattimella, koska kaistanleveyden ulkopuoliset taajuudet vääristyvät ulostulosignaaliin. Mittaushäiriöt tulisi suodattaa siten, että lopuksi kaapeliin syötettävän signaalin taajuus näkyisi suurimpana taajuusspektrissä ja syötettävän signaalin taajuus tulee valita siten että tämä on mahdollista. [43]

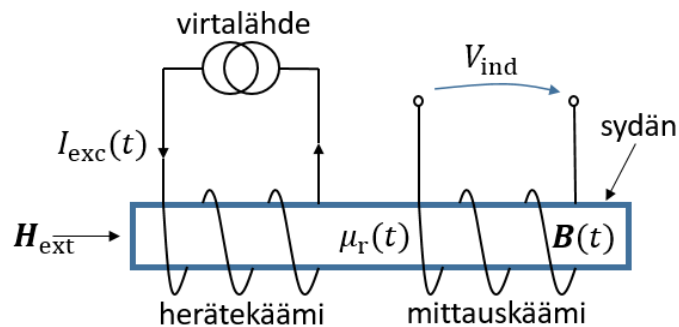


## 5.4 Fluxgate-magnetometrin toimintaperiaate

Magneettikentän mittaamiseen voidaan käyttää fluxgate-magnetometriä, joka on yleisimpiä magneettikentän mittalaitteita. Fluxgate-magnetometrillä voidaan mitata heikkoja staattisia, hyvin hitaasti muuttuvia ja pienitaajuisia magneettikenttiä 1 mT asti 0,1 nT resoluutiolla. Fluxgate-magnetometri kehitettiin alun perin sukellusveneidän ja merimii-  
nojen havaitsemiseen toisen maailmansodan aikana. [77]

Fluxgate-magnetometrit ovat vektorimagnetometrejä, jotka mittaavat magneettikentän amplitudia ja suuntaa. Fluxgate-magnetometri mittaa magneettikenttää sähkömagneettisen induktion kautta ja sen toiminta perustuu ferromagneettisesti pehmeän materiaalin epälineaariseen magnetoitumiseen eli hystereesi-ilmiöön, jota voidaan hyödyntää magneettikentän mittauksessa. [78]

Yksiakselisen fluxgate-magnetometrin yksinkertaistettu rakenne on esitetty kuvassa 5.9. Kolmeakselisessä fluxgate-magnetometrissa on kolme kuvan 5.9 mukaista rakennetta koh-  
tisuoraan toisiaan vasteen. Fluxgate-magnetometri koostuu herätekäämistä, mittauskää-  
mistä ja sydäimestä, jossa voidaan käyttää erilaisia rakenteita. Herätekäämiin syötetään  
ulkoisesta lähteestä vaihtovirtaa  $I_{exc}$ , joka synnyttää ajassa muuttuvan magneettikentän  
 $B(t)$  sydänmateriaalin ympäristöön. Mittauskäämi havaitsee muuttuvan magneettikentän,  
jolloin siihen indusoituu jännite aiemmin esitetyn kaavan (5.4) mukaisesti. Herätesignaali-  
n amplitudin tulee olla riittävän suuri kyllästäämään sydänmateriaali, joka on tehty mag-  
neettisesti pehmeästä helposti kyllästyvästä aineesta, jonka suhteellista permeabiliteettia  
 $\mu_r(t)$  muutetaan ajan suhteen. Magneettisen materiaalin kyllästyemisellä tarkoitetaan tilan-  
netta, jossa sydänmateriaalin kaikki alkeismagneetit ovat ulkoisen magneettikentän  $H_{ext}$   
suuntaisesti, eli toisin sanoen magneettikenttä on saturoitunut. Ulkoinen magneettikenttä  
saadaan määritettyä vertailemalla herätesignaalin ja ulkoisen magneettikentän indusoimia  
jännitteitä keskenään [79]

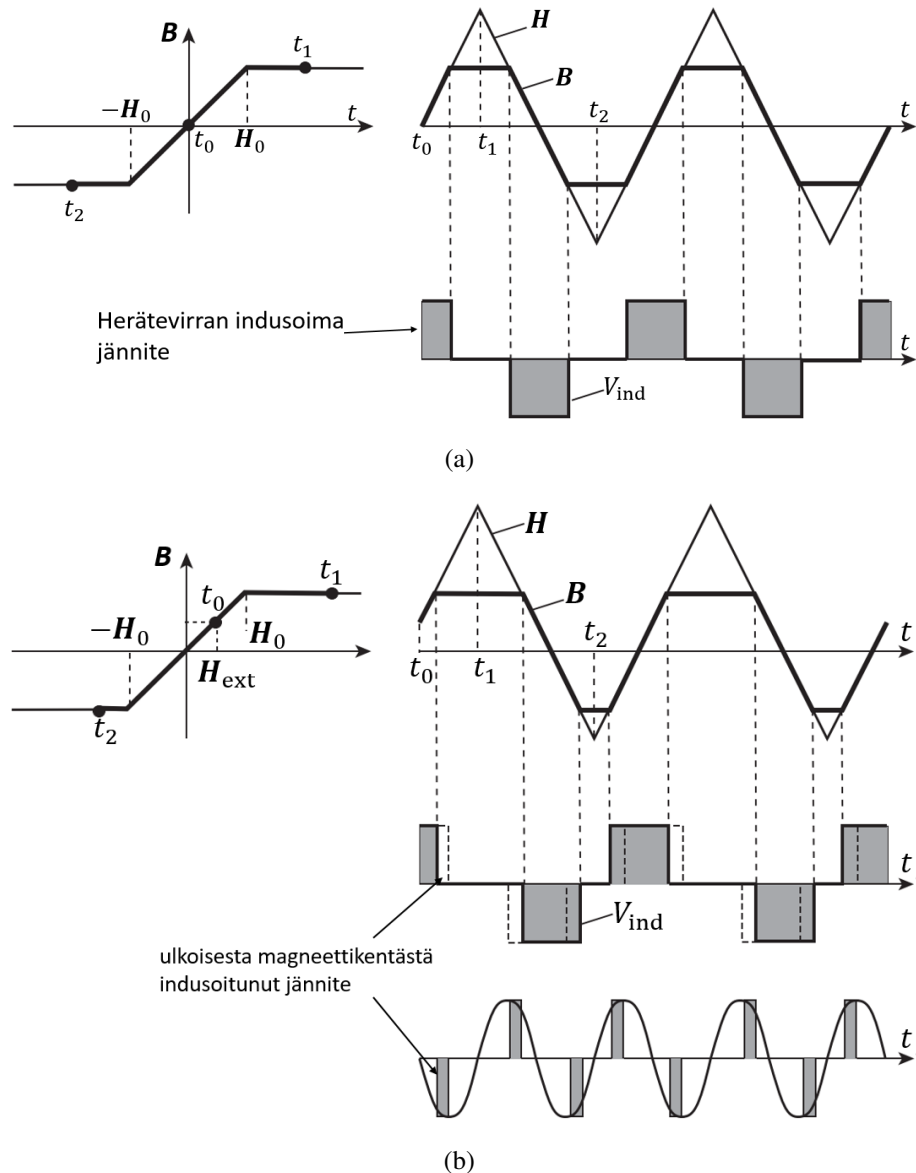


**Kuva 5.9.** Fluxgate-magnetometrin rakenne, muokattu lähteestä [78].

Kuvassa 5.10 on esitetty fluxgate-magnetometrin toiminta tarkemmin kuvan 5.9 mukai-  
sessa rakenteessa. Herätesignaalin avulla ajetaan sydäntä saturaatioon jokaisella vaihtovirran  
puolijaksolla. Sydän saturoituu hystereesikäyrän  $-H_0$  ja  $H_0$  pisteissä, minkä jälkeen

magneettivuontiheys  $B$  on vakio. Kuvassa 5.10(a) ulkoista magneettikenttä ei ole, jolloin mittauskäämiin indusoitunut jännite muodostuu ainoastaan herätesignaalin muodostamasta magneettikentästä. Mittauskäämiin indusoituu jännite Faradayn lain mukaisesti magneettivuon tiheyden muuttuessa, kuten kuvan 5.10(a) nousevien ja laskevien suorien aikana. Saturaatiotilassa magneettivuontiheys on vakio, jolloin mittauskäämiin ei indusoidu jännitettä. [79]

Kuvassa 5.10(b) on esitetty a-kohtaa vastaava tilanne, mutta nyt ulkoinen magneettikenttä  $H_{\text{ext}}$  vaikuttaa. Saturaatiossa sydänmateriaalin magneettinen resistanssi eli reluktanssi on suuri, jolloin ulkoinen magneettikenttä ei tunkeudu sydämeen. Kun sydän poistuu saturaatiosta, materiaalin reluktanssi pienenee, jolloin se tarjoaa pienempireluktanssisemmän tien ulkoiselle magneettikentälle kuin ilma [77]. Ulkoisesta magneettikentästä mittauskäämiin indusoitunut jännitteen taajuus on herätevirran taajuuden toinen monikerta, koska sydän saturoituu nopeammin ja poistuu saturaatiosta myöhemmin herätesignaalin toisen puolijakson aikana. Tämä voidaan huomata vertailemalla kuvien 5.10(a) ja 5.10(b) magneettivuon tiheyden saturoitumista molemmilta puolijaksoilta. Ulkoinen magneettikenttä saadaan määritettyä vähentämällä tapauksista a ja b indusoituneet jännitteet toisistaan. [79]



**Kuva 5.10.** Fluxgate -magnetometrin toimintaperiaatteet kuvan 5.9 mukaisessa rakenteessa a) kun ulkoista magneettikenttää ei ole b) kun ulkoinen magneettikenttä vaikuttaa. Kuvissa vasemmalla puolella hystereesikäyrät ja oikealla puolella mittauskäämiin indusoituneen jännitteen muodostuminen. Muokattu lähteestä [79].

Fluxgate-magnetometrin sydän toteutetaan yleensä kahdella sydämellä, joilla kumotaan herätesignaalin synnyttämä magneettikenttä. Tällöin mittauskäämiin indusoitunut jännite on nolla, jos ulkoista magneettikenttää ei ole, koska kahden sydämen herätesignaalien synnyttämät magneettikentät kumoavat toisensa. Ulkoisen kentän vaikutuksessa toinen sydän saturoituu aikaisemmin kuin toinen johtuen sydänmateriaalin epälineaarisesta magneetoitumisesta, jolloin sydämiä magneettikentät eivät kumoa toisiaan ja mittauskäämi havaitsee magneettivuon muutoksen. Mittauskäämi havaitsee magneettivuon muutokseen uudelleen, kun toinen sydän poistuu saturaatiosta aiemmin kuin toinen. Mittauskäämiin indusoituneen jännitteen taajuus on myös tällöin herätevirran taajuuden toinen moniker- ta. [78]

## 5.5 Magneetikentän mittaamisessa käytettävät laitteet

Kaapelin magneetikentän mittaamisessa käytettäviä laitteita käsitellään tässä kappaleessa vianpaikannuksen näkökulmasta. Käytettävillä laitteilla mahdollistetaan signaalin syöttäminen, vastaanottaminen ja käsittely. Signaalin syöttämisessä käsitellään signaaligeneraattoria ja signaalin vastaanottajana sekä käsittelijänä Aquadyne-kaapelivianpaikannuslaitetta. Lisäksi kappaleessa esitellään vianpaikannuslaitteen liikuttamiseen liittyviä vaihtoehtoja ja vertaillaan niiden käyttömahdollisuuksia vian sijainnista riippuen.

### 5.5.1 Signaalin syöttäminen

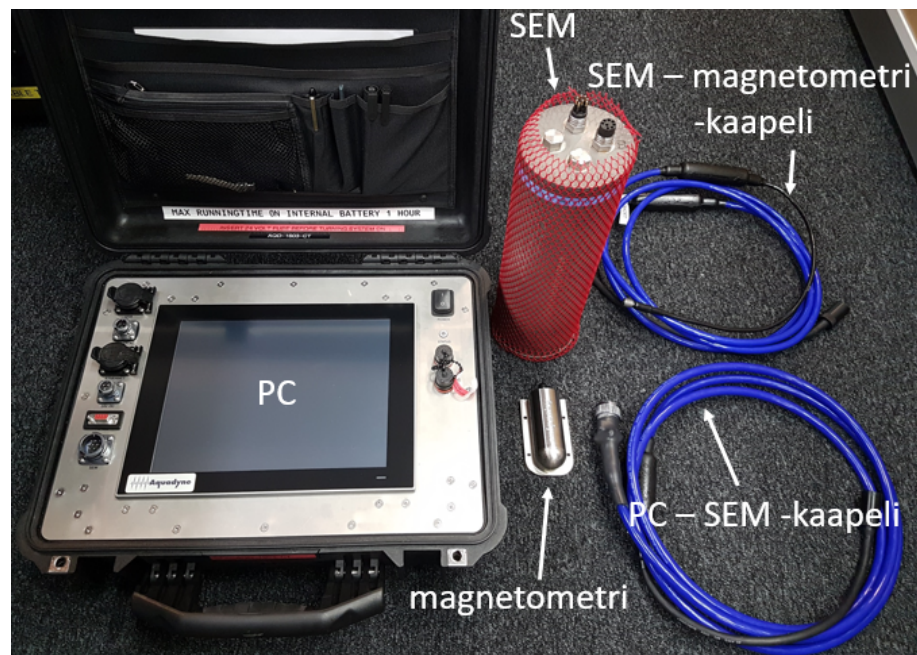
Signaaligeneraattorien ominaisuudet vaihtelevat toisistaan, minkä vuoksi on tärkeää tunnistaa vianpaikannuksen kannalta oleelliset asiat. Signaaligeneraattorin ominaisuuksia ovat esimerkiksi syötettävän signaalin aaltomuoto ja taajuusalue sekä sen syöttämä maksimiteho. Lisäksi signaaligeneraattori voi sisältää useampia kanavia, jolloin signaalia voidaan samanaikaisesti syöttää useampaan kuin yhteen kaapeliin. Tätä voidaan hyödyntää symmetrisillä monopolaarisilla yhteyksillä, joissa ehjän ja vikaantuneen kaapelin muodostamia magneetikenttiä voidaan vertailla. Tällöin vian kohdalla vikaantuneen kaapelin magneetikenttä pienenee, mutta ehjän kaapelin muodostama magneetikenttä pysyy vakiona. [80] Esimerkiksi EstLink 1 -kaapeliviassa molempiin kaapeleihin voidaan syöttää taajuuksiltaan erilaiset, mutta amplitudiltaan yhtä suuret signaalit. Tällöin magneetikentän muutos voidaan havaita vertaamalla vikaantuneen ja ehjän kaapelin magnetometriin indusoituneita tietyn taajuuksien jännitteitä. Kyseisellä tavalla pystytään myös minimoimaan kaapelin ja magnetometrin välisen etäisyyden vaihtelusta aiheutuvat häiriöt, koska mittaus perustuu kahden kaapelin muodostamien magneetikenttien vertailuun.

Signaaligeneraattori tulee olla galvaanisesti kytkettävissä kaapeliin, koska pienten taajuuksien käyttö ei mahdollista signaalin induktiivista kytkemistä. Vianpaikannukseen käytettävän signaaligeneraattorin taajuusalue tulee olla säädettävissä ja magnetometrin kaistanleveydelle sopiva [80]. Lisäksi signaaligeneraattorissa tulee olla amplitudiltaan tarpeeksi suuri syöttövirta. Vianpaikannusta on mahdollista nopeuttaa, jos signaaligeneraattorin signaalin parametreja on mahdollista säätää etänä, jolloin myös vältetään ylimääräinen päivystäminen asemalla. Erityisesti HVDC-kaapeleiden paikannukseen ja vianpaikannukseen sopiva signaaligeneraattori on esimerkiksi norjalaisen Aquadyne AS kehittämä 4-kanavainen signaaligeneraattori. [43] Kyseistä signaaligeneraattoria on esimerkiksi testattu Norjan ja Tanskan välisten Skagerrak-HVDC-yhteyksien merikaapeleiden paikannukseen, jolloin signaali on onnistuneesti paikannettu yhteyden siitä päästä, josta signaalia ei ole syötetty [73].

Fingrid ei omista signaaligeneraattoria, jolla voitaisiin syöttää pienitaajuisia jatkuva-aikaista vaihtovirtasignaalia kaapeliin [7]. Signaaligeneraattori on vianpaikannuksen kannalta välttämätön, jotta mittauksesta saadaan mahdollisimman luotettava tulos. Signaaligeneraattori on myös vianpaikannuksen valmiuden kannalta olennainen laite, jotta kaapelin vianpaikannus ei viivästy puuttuvan teholähteen vuoksi. [5]

### 5.5.2 Aquadyne-kaapelivianpaikannuslaite

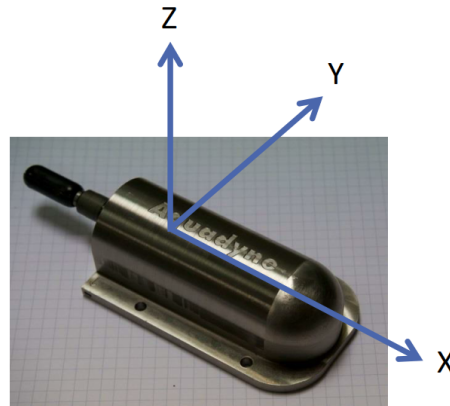
Fingridin magneettikentän mittalaitteisto on Aquadyne AS:n valmistama ja se on erityisesti suunniteltu kaapeleiden paikannukseen ja vianpaikannukseen. Mittalaitteisto on esitetty kuvassa 5.11 ja se koostuu yhdestä kolmeaksellisesta fluxgate-magnetometrasta, SEM-elektroniikkamoduulista (SEM, Subsea Electronics Module), tietokoneesta, virransyöttökaapelista, sekä 1,5 m ja 25 m datakaapeleista. SEM on moduuli, joka syöttää magnetometrille virran, käsittelee mittausdatan ja lähettää sen tietokoneelle. SEM saa virtansa tietokoneelta, jota voidaan syöttää virta ulkoisesta AC- tai DC-virtalähteestä. Kaapelivianpaikannuslaitteeseen on mahdollista asentaa lisäksi toinen kolmeakselinen fluxgate-magnetometri ja hydrofoni parantamaan kaapelin paikannuksen ja kaapelivianpaikannuksen tehokkuutta. [71]



**Kuva 5.11.** Aquadyne-kaapelivianpaikannuslaite.

Fluxgate-magnetometri ja magneettikenttien mittaussuunnat ovat esitetty kuvassa 5.12. Magnetometri sisältää kolme 20 mm x 2 mm -sauvasydäntä, joiden ympärillä on heräte- ja mittauskäämit. Sydämet ovat ortogonaalisesti toisiinsa nähden ja laitteen ulkokuori on tehty ei-magneettisesta titaanista. Magnetometri mittaa magneettikenttää samanaikaisesti x-, y- ja z-suunnasta ja sen mittausalue on  $\pm 200 \mu\text{T}$ , jonka ulkopuolella sydänmateriaali satureituu, jolloin mittauskäämiin ei indusoidu jännitettä. Magnetometrin kuvan 5.12

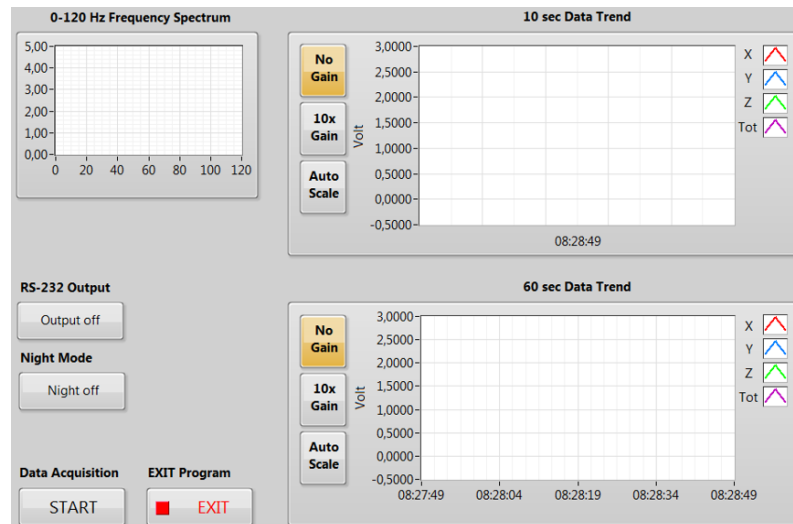
akselien sijoittuminen on tärkeää tietää, koska mittauskämeihin indusoituneiden jännitteiden perusteella voidaan tulkita magnetometrin sijainti kaapeliin nähden. [71]



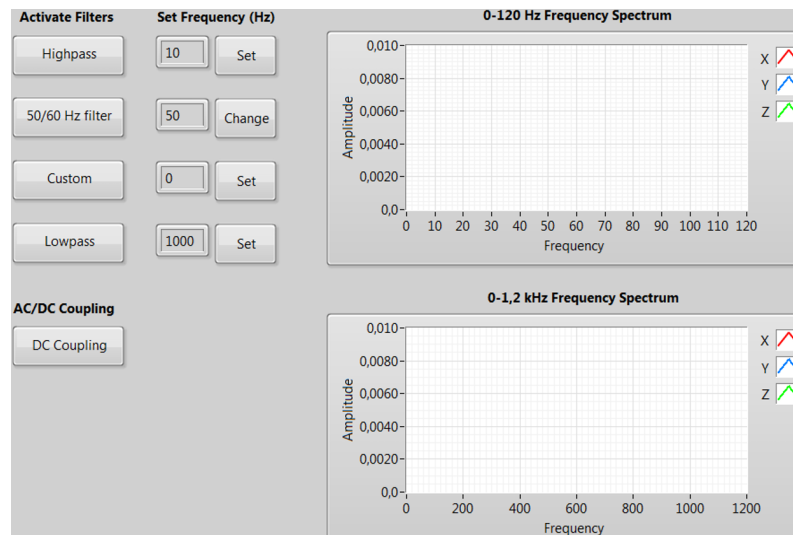
**Kuva 5.12.** Fluxgate-magnetometri ja magneettikentän mittaussuunnat [43].

SEM muuttaa magnetometrissä saadun analogisen mittaussignaalin digitaaliseen muotoon laitteiston tietokoneelle, josta voidaan lukea ulkoisesta magneettikentästä indusoitunut jännite. AD-muunnin on 24-bittinen ja sen resoluutio on teoriassa  $5 \text{ V} / 2^{24} \approx 0.3 \mu\text{V}$ . Indusoitunut jännite voidaan muuttaa takaisin magneettivuon tiheydeksi, sillä 1 V indusoitunut jännite vastaa noin  $35 \mu\text{T}$  suuruisia magneettikenttää magnetometrin teknisten tietojen perusteella [71]. Teoriassa  $0,3 \mu\text{V}$  indusoitunut jännite vastaa noin  $0,01 \text{ nT}$ , mutta todellisuudessa mittausrvoja saadaan  $1 \mu\text{V}$  eli  $0,035 \text{ nT}$  resoluutiolla. Edellä esitetyt arvot pätevät vain Aquadyne-kaapelivianpaikannuslaitteelle. [71]

Vianpaikannuslaitteen ohjelmiston päänäkymä ja suodatusnäky on esitetty kuvassa 5.13. Kuvan 5.13(a) päänäkymässä nähdään varsinainen mittaustulos eli magnetometrissä indusoitunut jännite ajan funktiona jokaiselle magneettivuon tiheyden komponentille erikseen sekä kokonaismagneettivuon tiheydelle. Päänäkymästä voidaan seurata indusoituneen jännitteen kokonaisamplitudia ja päätellä magnetometrin sijainti kaapeliin nähden magneettikentän komponenteista. Kuvan 5.13(a) taajuusspektristä voidaan myös seurata vianpaikannuksessa syötettävän taajuuden amplitudia.



(a)



(b)

**Kuva 5.13.** Vianpaikannuslaitteen ohjelmiston a) päänäkymä b) suodatusnäkymä.

Laitteistolla on mahdollista myös suodattaa mittaustulosta neljällä eri suodattimella, jotka on esitetty kuvan 5.13(b) vasemmassa yläkulmassa. Mittaustuloksesta voidaan suodattaa pois 50 Hz tai 60 Hz -taajuudet sekä ali- ja ylipäästösuodattimella pieni- ja suuritaajuiset signaalit, joita ei haluta nähdä mittaustuloksessa. Lisäksi on mahdollisuus suodattaa yksi omavalintainen taajuus. Taajuusspektriä tulee seurata vianpaikannuksen aikana, jotta pystytään havaitsemaan muutokset kaapelin muodostamassa magneettikentässä ja tunnistamaan mahdolliset häiriötekijät. [43, 71]

### 5.5.3 Vianpaikannuslaitteen käyttötavat

Vianpaikannuslaitetta on mahdollista käyttää merellä ROV-yhdistettynä, sukeltajan avulla tai suoraan veneestä. Käyttötavan valinnassa tulee ottaa huomioon ensisijaisesti oletettu

meren syvyys tutkittavalla kaapelivika-alueella, jotta vika saadaan paikannettua mahdollisimman luotettavasti ja tehokkaasti. Maalla vianpaikannuslaitetta voidaan käyttää esimerkiksi kävelemällä kaapelireittiä pitkin.

Taulukossa 5.1 on vertailtu Aquadyne-kaapelivianpaikannuslaitteen käyttötapaan liittyviä vaihtoehtoja tutkittavan vika-alueen meren syvyyden perusteella. Taulukon 5.1 vertailu on suoritettu laitteen teknisestä näkökulmasta parhaan mahdollisen mittaustuloksen saamiseksi. [82]

**Taulukko 5.1.** Aquadyne-kaapelivianpaikannuslaitteen käyttämisvaihtoehdot merellä teknisestä näkökulmasta. Perustuu meren syvyyteen tutkittavalla vika-alueella. Vihreä: soveltuu, keltainen: soveltuu tietyin ehdoin, punainen: ei sovellu.

Vian sijainti	ROV	Sukeltaja	Vene
Meren syvyys <5 m			
Meren syvyys 5–10 m	Soveltuu, mutta ei paras vaihtoehto		
Meren syvyys 10–20 m			Soveltuu, jos syötettävän signaalin amplitudi on riittävän suuri
Meren syvyys > 20 m		Soveltuu 30 m asti, hankittava uusi kaapeli	

Tyypillisesti kaapelin vianpaikannukseen käytettävien ROV:ien operointisyvyys on alle 300 m [81], mikä riittää Fingridin merikaapeleiden vianpaikannukseen. ROV:n käyttäminen matalissa vesissä voi estyä käytettävästä aluksesta johtuen, minkä lisäksi sen käyttäminen matalissa vesissä ei ole välttämättä järkevin vaihtoehto taloudellisesti. Sukeltajan sukellussyvyys on rajattu alle 30 metriin terveydellisistä syistä, mutta vianpaikannuslaitteiston kaapelin pituus rajoittaa tällä hetkellä sukeltajan käyttämisen noin 20 metriin kuten taulukosta 5.1 voidaan huomata [71]. Veneestä suoritettavan mittauksen maksimisyvyys on riippuvainen syötettävän signaalin amplitudista. Vedenpinnan yläpuolelta suoritettava paikannus voidaan suorittaa luotettavasti noin 10 metrin syvyyteen, mutta myös syvemmälle, jos syötettävän signaalin amplitudi on riittävän suuri. [82]

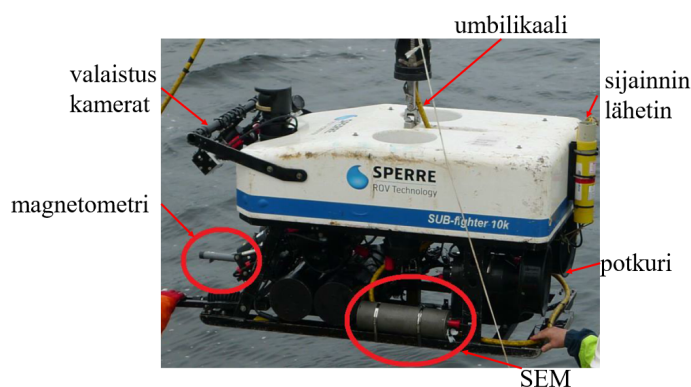
Meren syvyyden lisäksi tulee ottaa huomioon mittauksen jatkuvuus. ROV:lla ja veneellä mittausta voidaan suorittaa jatkuva-aikaisesti, kun taas sukeltajan on käytävä välillä pinnalla. Tällöin mittaustulos ei ole jatkuvaa kaapelireitin varrella ja vianpaikannus voi jatkua mahdollisesti eri kohdasta kuin viimeksi, jolloin riskinä on vian ohittaminen. Lisäksi valinnassa tulee ottaa huomioon, miten ROV:n kuljettajan, sukeltajan ja veneen kuljettajan ohjeistaminen kaapelireitillä onnistuu. [82]

Käyttötapojen kustannukset ovat erilaisia ja ne riippuvat eri tekijöistä kuten alusten saatavuudesta sekä vianpaikannukseen käytetystä ajasta. ROV:n käyttökustannukset muodostuvat itse laitteen ja aluksen mobilisoinnista ja sen käyttöön tarvittavasta miehistöstä. Aluksen koko, varustelutaso ja miehistön määrä vaihtelevat ROV:n koon mukaan. Sukel-



tajan kustannukset muodostuvat sukeltajasta ja sukelluksen valvojasta sekä tarvittavasta aluksesta ja miehistöstä. Suoraan veneestä paikannettaessa kustannukset muodostuvat vain käytettävästä aluksesta ja miehistöstä, koska vianpaikannuksessa ei ole sukellustarvetta. Näistä kolmesta vaihtoehdoista ROV:n käyttökustannukset ovat korkeimmat, mikäli oletetaan vianpaikannukseen käytettävän ajan olevan sama kaikilla vaihtoehdoilla. [82]

Vianpaikannuslaitteiston SEM ja magnetometri voidaan kytkeä ROV:iin kuvan 5.14 mukaisesti. SEM kiinnitetään ROV:n rakenteisiin ja magnetometri ei-magneettiseen runkoon riittävälle etäisyydelle ROV:sta. Sukeltajan tapauksessa SEM sijoitetaan käytettävään alukseen ja magnetometri kulkee sukeltajan mukana. ROV:n ja sukeltajan navigointi kaapelilla tapahtuu vianpaikannuksen mittaustuloksen tulkitsejan antamien ohjeiden välityksellä. Sukeltajan ja tulkitsejan väliseen kommunikointiin tarvitaan siihen sopiva laite. ROV:n ohjaaja ja sukeltaja voivat kulkea myös itsenäisesti kaapelireitillä, jos kaapelireitti on näkyvissä. Veneestä suoritettavassa mittauksessa SEM sijaitsee veneessä ja magnetometri on kiinnitetty ei-magneettiseen runkoon veneen ulkopuolelle. Veneestä suoritettavassa mittauksessa tulkitseja antaa ohjeet kaapelireitillä kulkemiseen. [43]



**Kuva 5.14.** Esimerkki kaapelin vianpaikannukseen käytettävästä ROV:sta, muokattu lähteestä [71].

Fingridillä merikaapeleiden tarkka vianpaikannus magnetometrillä muodostuu kolmannelta osapuolelta hankittavasta aluksesta tai muusta kalustosta käyttötavasta riippuen sekä merellä suoritettavasta työskentelystä. Aluksen koko vaikuttaa merkittävästi aluksen mobilisoinnista ja miehistöstä aiheutuviin kustannuksiin [83]. Toisaalta vianpaikannuslaitteen käyttötavat vaikuttavat suoritettavan mittauksen tehokkuuteen ja tarkkuuteen. Vianpaikannuksesta aiheutuvat kustannukset ovat kuitenkin yleensä pieni osa kaapelivian kokonaiskustannuksista [7]. Vianpaikannukseen on valittava tehokkain ja luotettavin käyttötapa ROV:n, sukeltajan tai vedenpinnan yläpuolelta veneestä suoritettavan mittauksen väliltä, jotta minimoidaan kappaleessa 3.3.1 käsiteltyjen vianpaikannuksen kustannusriskien todennäköisyys.

ROV:ja on monenlaisia ja niiden rakenteet ja varustelutaso vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaan. Kuvassa 5.14. on esitetty SUB-fighter 10k -ROV, jota voidaan käyttää esi-

merkiksi kaapelin vianpaikannukseen magnetometrillä. ROV lasketaan mereen laivasta vinssin avulla ja sillä on yhteys laivaan umbilikaalin välityksellä. Umbilikaalissa kulkevat ROV:n tehonsyöttökaapelit ja tietoliikennekaapelit. [83] Vianpaikannuksesta saadaan mahdollisimman tehokas ja tarkka, jos ROV:n varusteluun kuuluu vähintään:

- suuntamittari
- USBL-paikannusjärjestelmä (USBL, Ultra-Short BaseLine)
- syvyysmittari
- merenpohjan ja magnetometrin välinen etäisyysmittari
- valaistus ja kamerat
- kaksi magnetometriä

ROV:n varustelutasoon kuuluu yleisesti ainakin syvyysmittari ja suuntamittari. ROV-käytössä mittalaitteen kulkema reitti määritetään erillisen paikannusjärjestelmän avulla, koska GPS-signaalit eivät kulje vedessä. Järjestelmä mittaa ROV:n sijainnin laivaan nähden esimerkiksi käyttämällä vedenalaista akustista signaalin etenemiseen perustuvaa USBL-paikannusjärjestelmää, jonka antama tieto yhdistetään laivan GPS-sijaintiin. ROV:n lähetin lähettää signaalin, joka vastaanotetaan laivassa vastaanottimella, joka koostuu monista lähekkäin olevista mittamuuntimista. Mittamuuntimet mittaavat lähettimestä lähetettyjen signaalien kulkuaikaa, jolloin signaalin tunnetusta etenemisnopeudesta ja kulkuajasta saadaan laskettua laivan etäisyys ROV:iin. Kulkuaikojen aikaerosta pystytään laskemaan kulma, jossa ROV sijaitsee laivaan nähden. Etäisyyden, kulman ja laivan GPS-sijainnin perusteella saadaan määritettyä magnetometrin kulkureitti. Samalla saadaan määritettyä myös magnetometrin syvyys merenpinnasta. [81, 83]

Kaapelin vianpaikannuksessa ROV:n valaistus ja kamerat auttavat ROV:n ohjaajaa seuraamaan kaapelia, jos se ei ole haudattu tai hautaamisjäljet ovat näkyvissä. Lisäksi kameroilla voidaan havaita mahdolliset kolmannen osapuolen esimerkiksi ankkurin aiheuttamat jäljet merenpohjassa. ROV:n potkureilla pystytään ohjaamaan ja hallitsemaan ROV:n liikumista ja pyörimistä vaaka- ja pystysuunnissa. [81] Kuvan 5.14. mukaisessa ROV:ssa on viisi potkuria, joilla pystytään hallitsemaan ROV:n liikumista ja pyörimistä, joista aiheutuisi aina häiriöitä mittaustulokseen [84]. Lisäksi ROV:iin voidaan kytkeä muitakin sensoreita, joita voidaan käyttää esimerkiksi akustisissa ja askeljännitteen mittaukseen perustuvassa menetelmässä [43].

## **6. SUURJÄNNITTEISEN TASASÄHKÖKAAPELIN PAIKANTAMINEN MAGNEETTIKENTTÄÄ MITTAAMALLA**

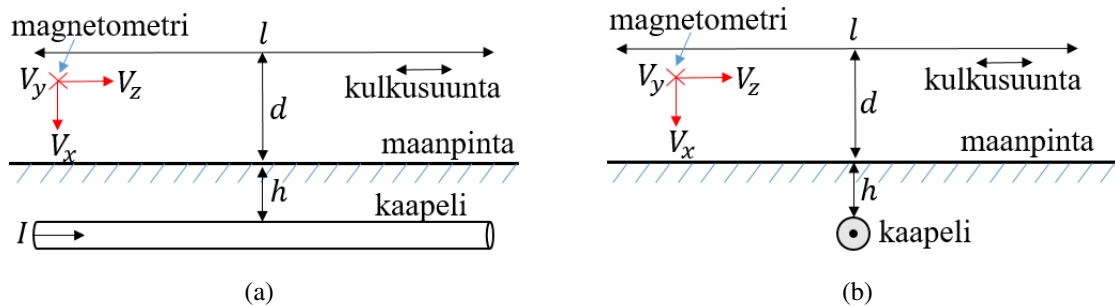
Tässä luvussa esitetään Aquadyne-kaapelivianpaikannuslaitteella saadut mittaustulokset jokaiselta työssä käsiteltävältä kaapelilta. Mittausten tarkoituksena on selvittää, voidaan-ko laitteistolla luotettavasti paikantaa kaapeli ja mahdollinen kaapelivika. Mittaustulosten perusteella tutkitaan myös miten magnetometrin eri magneettivuon tiheyden komponentit käyttäytyvät kaapelin paikantamisessa ja miten niitä voidaan hyödyntää kaapelireitin seurannassa. Mittaustuloksista pyritään myös analysoimaan, mitkä tekijät vaikuttavat mittaustulokseen ja miten häiriötekijät pystytään minimoimaan.

### **6.1 Mittausjärjestelyt**

Kaapelin paikantaminen Aquadyne-kaapelivianpaikannuslaitteella suoritetaan kuormituksen ollessa mahdollisimman suuri, koska korkea kuormitus helpottaa paikannusta. Fenno-Skan -kaapeleiden ja EstLink 2 -kaapelin paikantaminen suoritetaan paikantamalla tasavirrassa esiintyvien harmonisten yliaaltojen synnyttämiä magneettikenttiä ja suodattamalla mittaustuloksesta alhaiset taajuudet, 50 Hz taajuus sekä mittalaitteen kaistanleveyden ulkopuoliset suuret taajuudet. Lisäksi Fenno-Skan -kaapeleita paikannetaan mittaamalla tasavirran muodostamaa magneettikenttää. EstLink 2 -kaapelilla pää- ja paluujohtimessa kulkevat virrat ovat erisuuruiset, koska osa virrasta palaa maaperän tai meren kautta, mikä vuoksi magneettikenttää esiintyy myös kaapelin ulkopuolella. EstLink 1 -kaapelin paikannus suoritetaan mittaamalla kaapelin tasavirran muodostamaa magneettikenttää, koska VSC -yhteyden suurimmat harmoniset yliaallot ovat mittalaitteen kaistanleveyden ulkopuolella.

Magneettikentän mittaaminen suoritetaan kahdella eri tavalla kuvan 6.1 mukaisesti kulkemalla kävellen oletetun kaapelireitin yläpuolella kaapelin suuntaisesti kuva 6.1(a) ja kulkemalla kävellen poikkisuunnassa kaapelin ylitse kuva 6.1(b). Paikannus suoritetaan kahdella esitetyillä tavoilla, koska oikeassa vianpaikannustilanteessa kuljetaan joko kaapelireittiä pitkin tai siksakkia kaapelin ylitse. Näiden mittausten lisäksi, magnetometrillä pyritään selvittämään kaapelin hautausvyvyys liitteen A mukaisesti kolmiomittauksen

avulla, jolloin mitataan vain y- ja z-suuntaisiin käämeihin indusoituneita jännitteitä ja kahden mittauspisteen välinen etäisyys. Näiden avulla pystytään laskemaan kaapelin haudaus- syvyys liitteessä A esitetyllä tavalla.



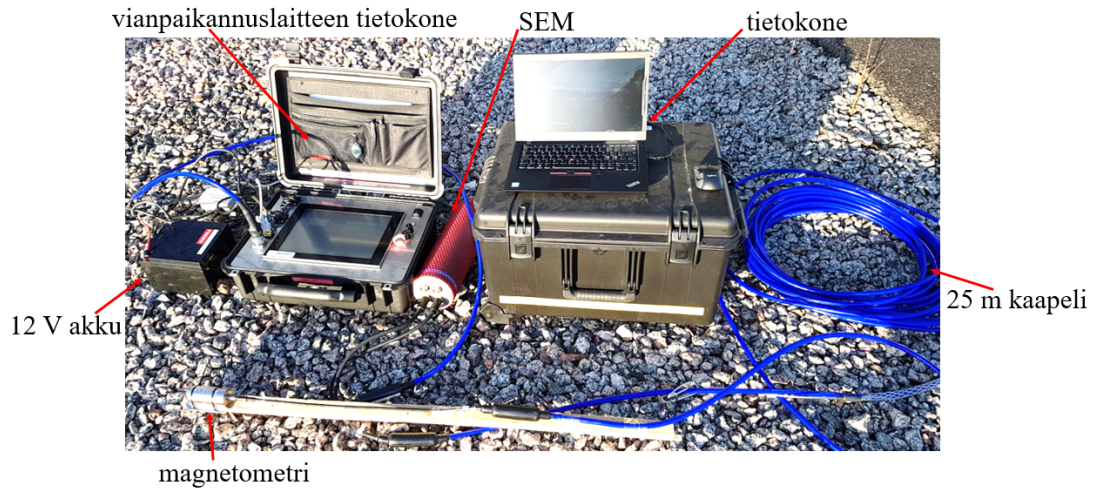
**Kuva 6.1.** Kaapelin paikantamisen periaatekuvat a) kaapelia pitkin b) kaapelin ylitse. Magnetometrien käämit ovat asetettu kuvien mukaisesti mittausten aikana.

Magnetometriä pidetään kuvan 6.1(a) ja 6.1(b) osoittamassa asennossa mittauksen aikana. Kuvassa 6.1(a) x-suuntainen käämi on pystysuunnassa kaapeliin nähden, y-suuntainen käämi on vaakatasossa kaapelin nähden, z-suuntainen käämi on kaapelin suuntaisesti ja kulkusuunta on akselin z-suuntaisesti. Kuvan 6.1(a) mukaisessa mittauksessa magnetometrin y-suuntaiseen käämiin indusoituva jännite on maksimissaan ja x- sekä z-suuntaisiin käämeihin indusoituvat jännitteet ovat minimissään kohtisuoraan kaapelin yläpuolella. Kuvassa 6.1(b) y- ja z-suuntaisten käämien sijainti on a-kohtaan verrattuna käänteinen kaapeliin nähden. Kaapelin yläpuolella x-suuntaiseen käämiin indusoitava jännite on minimissään, z-suuntaiseen käämiin indusoituva jännite on maksimissaan ja kaapelin suuntaisesti olevaan y-käämiin indusoituva jännite on minimissään koko mittauksen ajan. Magneettikenttiä mitatessa muutetaan magnetometrin korkeutta maanpinnasta  $d$ , jolloin pyritään selvittämään, miten magnetometrin etäisyys kaapeliin vaikuttaa mittaustulokseen. Mittaaminen suoritetaan kävelemällä kaapelireittiä pitkin ja kaapelireitin poikki mahdollisimman tasaisella nopeudella ja magnetometrin kulkema reitti määritetään mittaamalla etäisyys  $l$ .

Kolmiomittaus suoritetaan liitteen A kuvan A.1 mukaisesti mittaamalla y- ja z-käämeihin indusoituneet jännitteet samalta etäisyydeltä molemmiin puolin kaapelia, x-käämiin ollessa kaapelin suuntaisesti. Haudaussyvyuden määrittämisessä liitteessä A esitetyllä tavalla saavutetaan paras tulos, kun magnetometrin y- ja z-käämeihin indusoituneet jännitteet ovat amplitudiltaan yhtä suuret, jolloin magnetometrin ja kaapelin välinen kulma on 45 astetta. Ulkoisten kenttien aiheuttamia häiriöitä ei oteta huomioon haudaussyvyuden määrittämisessä, koska niiden vaikutusten oletetaan olevan hyvin pieniä.

Kuvassa 6.2 on esitetty kaapelin paikantamisessa käytettävä mittausvälineistö. Magnetometri on kiinnitetty puiseen mittaustukeen, jota käyttämällä pyritään minimoimaan mitaushäiriöt ja pitämään magnetometri mahdollisimman vakaana mittaajan mukana. Magnetometri on yhdistetty 25 metrin mittauskaapelilla SEM:iin, josta se on yhteydessä vian-

paikannuslaitteiston tietokoneeseen. Tietokoneelta on RS232-sarjaliikenneväylän kautta yhteys toiseen tietokoneeseen, johon tallennetaan saadut mittaustulokset. Mittausarvoja tallennetaan 1 tai 10 Hz taajuudella. Vianpaikannuslaitetta syötetään ulkoisella 12 V akulla, jolla ehkäistään vianpaikannuslaitteen oman akun tyhjentymisen ja siten mittauksen turha keskeytyminen.



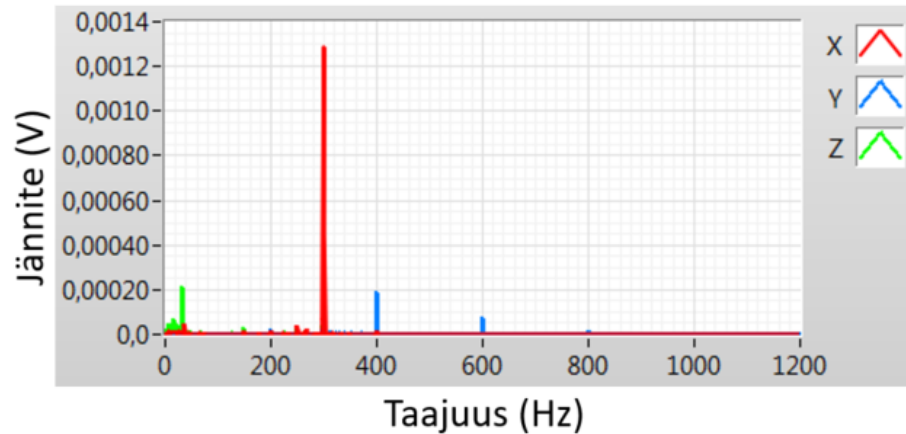
**Kuva 6.2.** Kaapelin paikantamisessa käytettävä mittausvälineistö.

Kaapelin paikantamiseen tarvitaan kaksi henkilöä, joista toinen käynnistää ja lopettaa mittauksen ja toinen kuljettaa magnetometriä määritetyllä kaapelireitillä. Mittauksen käynnistäjällä ja lopettajan vastuulla on myös tulkita saatua mittaustulosta, koska mittaajalla ei ole mahdollisuutta nähdä saatua mittaustulosta. Tästä johtuen tulkitsija ohjaa mittaajaa kaapelireitillä magnetometriin indusoituneiden jännitteiden perusteella. Ennen varsinaisia mittauksia kaapelin sijainti varmistetaan kulkemalla oletetun kaapelireitin ylitse kuvan 6.1(b) mukaisesti ja tulkitsemalla magnetometrin eri käämeihin indusoituneista jännitteistä kaapelin paikka.

## 6.2 Fenno-Skan 1 ja 2

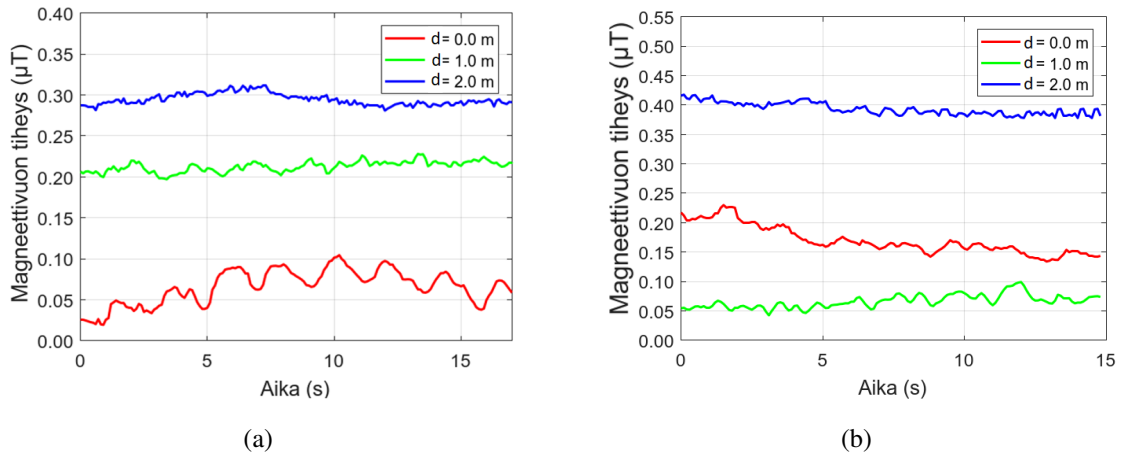
Fenno-Skan-kaapeleiden paikantaminen suoritettiin kohdasta, jossa Haurilahdentie ylittää kaapelit, kohta on esitetty tarkemmin liitteessä B. Molempien yhteyksien siirtoteho on mittausten aikana maksimissaan Ruotsista Suomeen päin. Mittausten aikana Fenno-Skan 1 -kaapelissa kulkeva virta oli noin 1289 A ja Fenno-Skan 2 -kaapelissa noin 1620 A [68]. Fenno-Skan 1 -kaapelin virta kulkee aina Suomesta Ruotsiin päin ja Fenno-Skan 2 -kaapelin virta Ruotsista Suomeen päin [7]. Näin ollen, kaapeleiden muodostamat magneettikentät vaimentavat toisiaan. Liitteen B mukaisella mittausalueella Haurilahdentien kohdalla kaapeleiden keskipisteiden väliseksi etäisyydeksi määritettiin mittaamalla noin 10 metriä. Mittausten aikaisena näytteistystaajuutena käytettiin 10 Hz.

Kuvassa 6.3 on esitetty yhden mittaushetken aikainen magnetometriin indusoituneiden jännitteiden taajuusspektri Fenno-Skan 1 -kaapelin yläpuolelta maanpinnan korkeudelta mitattuna, kun mittauksesta on suodatettu ylimääräiset harmoniset taajuudet. Kuvasta voidaan huomata, että kolmivaiheisen vaihtosähkön tasasuuntauksesta aiheutuvan 300 Hz harmonisen yliaaltovirran muodostama magneettikenttä indusoituu magnetometriin selvästi suurimpana jännitteenä.



**Kuva 6.3.** Fenno-Skan 1 -kaapelin yläpuolelta, maanpinnan korkeudelta, harmonisten yliaaltovirtojen muodostamien magneettikenttien magnetometriin indusoimat jännitteet yhden mittaushetken aikana.

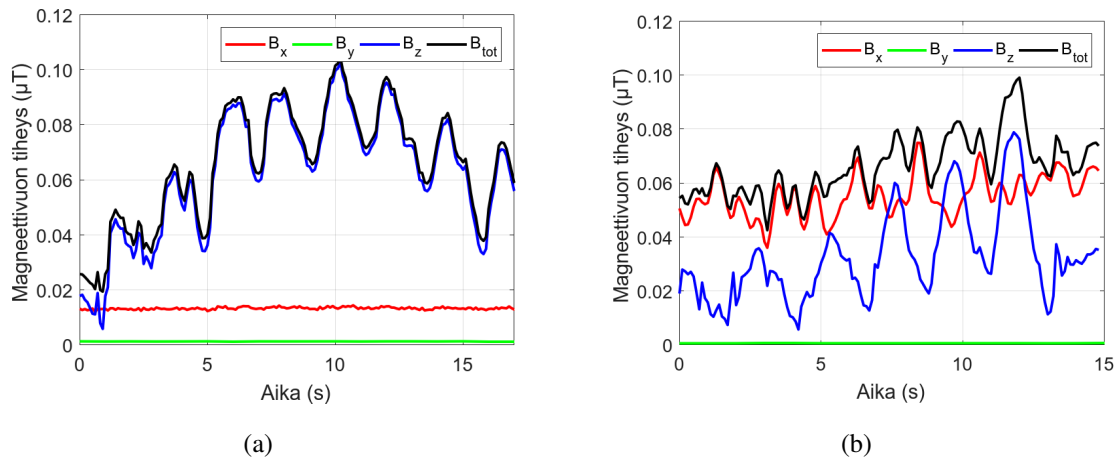
Kuvassa 6.4(a) on esitetty Fenno-Skan 1 -kaapelin ja kuvassa 6.4(b) Fenno-Skan 2 -kaapelin paikantaminen harmonisten yliaaltovirtojen muodostamien magneettikenttien avulla ja kuljettamalla magnetometriä kaapelireittiä pitkin (kuva 6.1(a)). Paikantaminen on suoritettu liitteen B mukaisesti Haurilahdentien kohdalla ja paikannus on suoritettu kolmella eri korkeudella  $d$ , kun mittalaitteen kulkema matka  $l = 5$  m. Kuvista 6.4(a) ja 6.4(b) voidaan huomata, että mitattu magneettivuon tiheys on suurimmillaan, kun etäisyys maanpinnasta on suurin. Kaapeleiden virrat kulkevat vastakkaisiin suuntiin, jolloin niiden muodostamat magneettikentät kumoavat toisiaan. Kuvien 6.4(a) ja 6.4(b) perusteella Fenno-Skan 1 -kaapelilla magneettikenttien kumoutuminen on voimakkainta kun  $d = 0$  m ja Fenno-Skan 2 -kaapelilla kumoutuminen on voimakkainta kun  $d = 1$  m. Kaapeleissa kulkevat virrat ovat erisuuruiset, minkä vuoksi magneettikentät kumoavat toisiaan tietyissä pisteissä erilaisesti. Etäisyyden  $d$  kasvaessa riittävän suureksi ( $d = 2$  m) magneettikenttien kumoutuminen pienenee suhteessa mitattavaan magneettikenttään, jolloin mitattu magneettikenttä vaikuttaa voimistuvan. Mittaustuloksista voidaan huomata, että magneettivuon tiheys pysyy lähes vakiona mittalaitteen kulkemalla reitillä paitsi kuvan 6.4(a) mittauksessa, jossa  $d = 0$  m. Erot aiheutuvat magnetometrin etäisyyden vaihtelusta kaapeliin, mittaaajan kulkunopeuden muutoksesta ja magnetometrin kiertymisestä akseliensa suhteen.



**Kuva 6.4.** Harmonisten yliaaltovirtojen muodostamien magneettivuon tiheyksien kokonaisarvot Hauriladentien kohdalla liitteen B mukaiselta mittausalueelta, kun paikannus on suoritettu kulke-malla kaapelireittiä pitkin a) Fenno-Skan 1 -kaapelireitillä b) Fenno-Skan 2 -kaapelireitillä. Mit-taukset on tehty kolmella eri korkeudella maanpinnasta ja mitattu matka  $l = 5$  m.

Kuvassa 6.5 on esitetty magneettivuontiheyden komponentit ja kokonaisarvo kuvan 6.4 mittauksista, missä Fenno-Skan 1 -kaapelilla  $d = 0$  m (kuva 6.5(a)) ja Fenno-Skan 2 -kaapelilla  $d = 1$  m (kuva 6.5(b)). Kuvassa 6.5(a) magneettivuon tiheyden kokonaisarvo muodostuu lähes pelkästään kaapelin suuntaisesti olevasta komponentista  $B_z$ , koska kaapeleiden magneettikenttien kumoutuminen tällä etäisyydellä on voimakasta, minkä vuoksi kaapeliin nähden vaakatasossa olevan komponentin magneettivuon tiheys  $B_y$  on hyvin pieni verrattuna kokonaisarvoon. Magneettivuon tiheyden kokonaisarvo ei pysy vakiona, koska kaapelin suuntaisesti sijaitseva käämi liikkuu oman akselinsa suhteen mittauksen ajan, jolloin mitattavaan magneettikenttään muodostuu virhettä. Lisäksi magnetometrin ja kaapelin välinen etäisyyden vaihtelu aiheuttaa virhettä mittaustulokseen. Kuvassa 6.5(b) kaapeliin nähden vaakatasossa olevan komponentin  $B_y$  magneettivuon tiheys on hyvin pieni a-kohdan tavoin, kun etäisyys kaapelista  $d = 1$  m. Kuvista 6.5(a) ja 6.5(b) voidaan päätellä kuvissa 6.4(a) ja 6.4(b) ilmenneet erot, koska kaapeliin nähden vaakatasossa oleva komponentti  $B_y$  kumoutuu näissä kohdissa eniten, mikä johtuu kaapeleiden erisuuruuksista virroista.

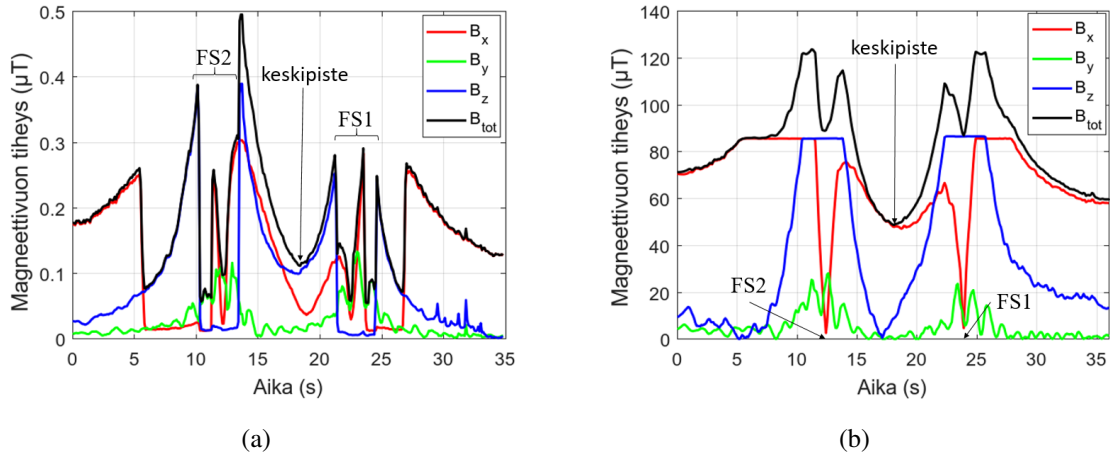




**Kuva 6.5.** Harmonisten yliaaltovirtojen muodostamien magneettivuon tiheyksien komponentit ja kokonaisarvot Haurlahdentien kohdalla liitteen B mukaiselta mittausalueelta, kun paikannus on suoritettu kulkemalla kaapelireittiä pitkin a) Fenno-Skan 1 -kaapelireitillä, kun  $d = 0$  m b) Fenno-Skan 2 -kaapelireitillä, kun  $d = 1$  m. Mitattu matka  $l = 5$  m.

Kuvassa 6.6 on esitetty mittaustulokset Haurlahdentien kohdalla kuljettaessa molempien kaapeleiden ylitse (kuva 6.1(b)), kun etäisyys maanpintaan  $d = 0$  m ja mitattu matka  $l = 30$  m. Mittaus suoritettiin kulkemalla Fenno-Skan 2 -kaapelilta Fenno-Skan 1 -kaapelin suuntaan. Kuvassa 6.6(a) kaapelin paikantaminen on suoritettu mittaamalla kaapelissa kulkevan 300 Hz yliaaltovirran aiheuttamaa magneettikenttää. Kuvasta 6.6(a) voidaan huomata noin ajanhetkiltä 10–14 s ja 22–25 s, että kaapelit vaikuttavat hyvin paljon toistensa magneettikenttiin, mutta ne voidaan kuitenkin karkeasti sijoittaa näille alueille. Näillä ajanhetkillä magneettivuon tiheyden kokonaisarvo vaihtelee, kun vastaavasti yhden kaapelin tapauksessa magneettivuon tiheyden kokonaisarvo kasvaisi eksponentiaalisesti suoraan maksimiin, jonka jälkeen se laskisi samanlaisesti. Tämän vuoksi kaapelin sijainnin määrittäminen mittaustuloksesta on hankalaa, jolloin esimerkiksi vianpaikannuksessa on vaikea määrittää, milloin ollaan kohtisuoraan kaapelin yläpuolella, jos mittaustulokseen vaikuttaa toinen kaapeli tai muu merkittävä häiriölähde.





**Kuva 6.6.** Fenno-Skan 1 ja Fenno-Skan 2 -kaapeleiden paikantaminen Haurlahdentien kohdalla mittaamalla a) harmonisten yliaaltovirtojen muodostamaa magneettikenttää b) tasavirran muodostamaa magneettikenttää. Mittauksessa  $d = 0$  m,  $l = 30$  m ja mittaus on aloitettu Fenno-Skan 2 -kaapelin puolelta Fenno-Skan 1 -kaapelia kohti. Kuvii merkitty kaapeleiden määritetyt sijainnit ja kaapeleiden välinen keskipiste.

Kaapeleita paikannettiin myös kulkemalla poikkisuunnassa kaapeleiden ylitse (kuva 6.1(b)) ja mittaamalla kaapeleiden tasavirran muodostamaa magneettikenttää, mittaustulos on esitetty kuvassa 6.6(b). Tasavirran muodostamaa magneettikenttää mittaamalla kaapeleiden sijainti voidaan erottaa selkeämmin kuin vaihtovirran muodostamaa magneettikenttää mitattaessa. Kaapelit voidaan tasavirran aiheuttamaa magneettikenttää mittaamalla paikantaa kohtaan, jossa kaapeliin kohtisuorassa oleva magneettivuon tiheyden komponentti ( $B_x$ ) on minimissään. Fenno-Skan 2 -kaapelin keskipiste sijaitsee noin kohdassa 12–13 s, kaapeleiden välinen keskipiste sijaitsee noin kohdassa 17–18 s ja Fenno-Skan 1 -kaapelin keskipiste noin kohdassa 23–24 s, kuten kuvasta 6.5(b) voidaan huomata.

Magneettivuon tiheyden kokonaisarvo on todellisuudessa suurempi kuin kuvan 6.6(b) mittaustulos kaapelin yläpuolelta ja sen läheisyydessä. Magnetometrin yhteen käämiin voi indusoidua maksimissaan noin  $\pm 2,5$  V jännite ( $\pm 87,5$  μT), jonka vuoksi kuvan 6.6(b) magneettivuon tiheyden kokonaisarvo ei saavuta todellista maksimiaan. Magneettivuon tiheyden x- ja z-komponentteja mittaavat käämit saturoituvat kaapelin läheisyydessä, vaikka todellisuudessa mitattava magneettikenttä olisi suurempi.

Taulukossa 6.1 on esitetty oletetut ja kolmiomittauksella määritetyt haudaussyvyudet molemmille kaapeleille Haurlahdentien kohdalla, kun magnetometri on maanpinnalla ( $d = 0$  m). Kaapeleiden tämänhetkisestä haudaussyvyydestä ei ole tarkkaa tietoa, mutta asennussyvyys on vähintään metri alkuperäisten asennusdokumenttien perusteella. Magnetometrin ja kaapelin väliset kulmat vaakasuoraan maanpintaan nähden on laskettu kymmenen mittaustuloksen keskiarvolla ja mittaustulokseen on arvioitu  $\pm 0,1$  metrin virhemarginaali mittauspisteiden väliseen etäisyyteen.

**Taulukko 6.1.** Fenno-Skan 1- ja Fenno-Skan 2 -kaapeleiden oletetut ja kolmiomittauksella määritetyt hautausyvytydet Haurilahdentien kohdalla mittauspisteiden etäisyyksillä  $l = 3,0$  m ja  $l = 5,0$  m.

Kaapeli	Oletettu hautausyvytyys (m)	Mitattu hautausyvytyys (m)	
		$l = 3,00 \text{ m} \pm 0,10 \text{ m}$	$l = 5,00 \text{ m} \pm 0,10 \text{ m}$
Fenno-Skan 1	vähintään 1,00	$1,58 \pm 0,05$	$1,67 \pm 0,03$
Fenno-Skan 2	vähintään 1,00	$1,48 \pm 0,05$	$1,16 \pm 0,02$

Pienemmällä etäisyydellä magnetometrin ja kaapelin välinen laskettu kulma molemmilla kaapeleilla on lähellä 45 astetta, kun taas suuremmalla etäisyydellä kulma pienenee ja laskentaan aiheutuu epätarkkuutta. Näin ollen, molempien kaapeleiden hautausyvytyden mittauksessa mittauspisteiden välisen etäisyyden  $l$  ollessa 3 m, saavutettu tulos on luotettavampi kuin etäisyydellä  $l = 5$  m.

Fenno-Skan -kaapeleiden paikannusta vaikeutti niiden sijainti lähellä toisiaan, koska tällöin kaapelit vaikuttavat toistensa magneettikenttiin hankaloittaen mittaustuloksen tulkitsemista. Tästä johtuen kaapelivian paikantaminen voi olla hankalaa alueilla, joissa on käytössä olevia esimerkiksi kaapeleita tai avojohtoja, jotka indusoivat vianpaikannussignaalia suurempia jännitteitä magnetometriin. Tällaisessa tilanteessa tulee häiriöiden minimoiseksi olla erityisen huolellinen vikaantuneeseen kaapeliin syötettävän signaalin valinnassa, sekä mittalaitteen häiriösuodatusasetteluissa.

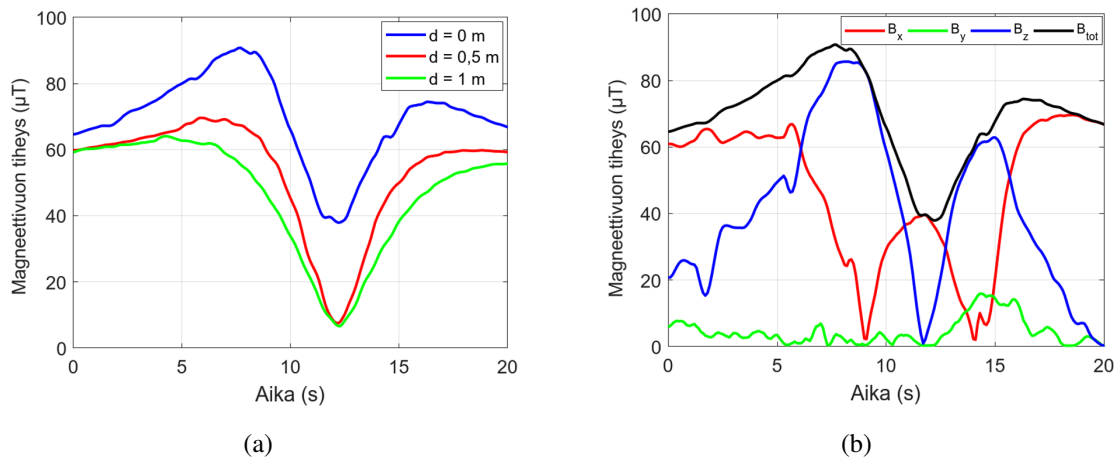
### 6.3 EstLink 1

EstLink 1 -kaapeleiden paikantaminen suoritettiin Espoon tasavirta-aseamalla DC-hallin läheisyydessä aidan lähellä liitteen C mukaiselta alueelta. Yhteys on kahdella yksijohdinkaapelilla toteutettu symmetrinen monopolaarinen HVDC-yhteys, jossa kaapeleiden virrat kulkevat eri suuntiin. Mittaukset suoritettiin paikantamalla kaapeleiden tasavirran muodostamaa magneettikenttää. Harmonisten yliaaltovirtojen aiheuttamien magneettikenttien paikantaminen ei onnistunut, koska VSC-yhteyden suurimpien harmonisten yliaaltovirtojen taajuus on magnetometrin kaistanleveyden ulkopuolella. Kaapeleita ei paikannettu kuljettamalla magnetometriä kaapelireittiä pitkin, koska kaapeleiden sijainnista ja asennussyvytydestä DC-hallin ja aidan välillä ei ollut tarkkaa tietoa, jolloin paikantaminen oli hankalaa.

Mittauksien aikana yhteyden tehonsiirto oli Suomesta Viroon päin ja se vaihteli 368 MW ja 285 MW välillä [68]. Yhteydellä ei ole mittaustietoja tasavirran suuruudesta, mutta siirtotehosta ja yhteyden käyttöjännitteestä voidaan laskea virran olleen mittausten aikana noin 1218 A suuremmalla teholla ja 944 A pienemmällä teholla. Paikannuksen aikaiset kaapeleiden virtojen suunnat on esitetty liitteessä C. Kaapeleiden muodostamat magneettikentät vaimentavat toisiaan, koska kaapeleiden virrat kulkevat eri suuntiin. Mittausten

näytteistystaajuutena käytettiin 10 Hz ja lumen paksuus mittauspaiassa oli 0,3 m, jolloin maanpinnan nollassa määritettiin tähän kohtaan.

Kuvassa 6.7 on esitetty EstLink 1 -kaapeleiden mittaustulokset kun kuljetaan kaapelireitin ylitse poikkisuunnassa (kuva 6.1(b)). Mittauksessa kuljetaan Halujärventien puoleisesta kaapelilta toista kaapelia kohti. Kuvassa 6.7(a) on esitetty tasavirran muodostama magneettivuon tiheyden kokonaisarvo kolmelta eri korkeudelta  $d$ , kun mitattu matka  $l = 10$  m. Mitattu magneettikenttä on oletetusti suurempi, mitä pienempi etäisyys magnetometrini ja kaapelin välillä on. Kuvassa 6.7(b) on esitetty magneettivuon tiheyden komponentit ja kokonaisarvo maanpinnan tasolta mitattuna. Magneettikenttä on suurempi Halujärventien puoleisessa kaapelissa, koska tällöin maan magneettikenttä vahvistaa kaapelin muodostamaa magneettikenttää ja toisessa kaapelissa vastaavasti heikentää magneettikenttää.



**Kuva 6.7.** EstLink 1 -kaapeleiden paikantaminen kulkemalla poikkisuunnassa kaapeleiden ylitse ja mittaamalla kaapeleissa kulkevan tasavirran muodostamaa magneettikenttää, kun  $l = 10$  m a) magneettivuon tiheyden kokonaisarvot kolmelta eri korkeudelta  $d$  ja b) magneettivuon tiheyden komponentit ja kokonaisarvo, kun  $d = 0$  m. Kaapelin virta mittaushetkellä on noin 1218 A.

Magnetometri on kaapeleiden keskipisteiden välissä, kun magneettivuon tiheyden kokonaisarvo  $B_{\text{tot}}$  on minimissään, koska tällöin kaapeleiden muodostamat magneettikentät kumoavat toisiaan eniten. Tämä voidaan huomata myös kuvassa 6.7(b): kohtisuoraan maanpintaan vasten olevan käämin magneettivuon tiheys  $B_x$  on noin kokonaisarvon suurin ja vaakatasossa kaapeliin nähden olevan käämin magneettivuon tiheys  $B_z$  on minimissään. Kaapelin suuntaisen käämin magneettivuon tiheys  $B_y$  on minimissään koko mittauksen ajan. Kuvassa 6.7(b) voidaan huomata kaapeleiden keskipisteet, kun vaakatasossa kaapeliin nähden oleva magneettivuon tiheys  $B_z$  on maksimissaan ja kohtisuoraan maanpintaa vasten oleva magneettivuon tiheys  $B_x$  minimissään. Mitatut magneettivuon tiheyden arvot kaapelin yläpuolella ovat erisuuret, koska toisessa kaapelissa maan magneettikenttä vahvistaa ja toisessa vaimentaa muodostunutta magneettikenttää.

Taulukossa 6.2 on esitetty kolmiomittauksella saadut mittaustulokset kaapeleiden hautausvyvyydestä DC-hallin läheisyydessä sijaitsevan aidan lähellä, kun mittauspisteiden

välinen etäisyys on  $l = 3$  m ja  $l = 5$  m. Kaapeleiden hautaus­syvyydestä ja keskipisteiden välisestä etäisyydestä ei ole tarkkaa tietoa, jonka vuoksi oletetun hautaus­syvyyden virhemarginaali on suuri. Magnetometrin ja kaapeleiden väliset kulmat maan­pinnan ta­soa vasten on laskettu kymmenen mittausarvon keskiarvolla ja laskennassa on huomioitu  $\pm 0,1$  metrin arvioitu virhemarginaali mittaus­pisteiden väliseen etäisyyteen. Taulukossa 6.2 on huomioitu 0,3 metrin lumen paksuus, mikä on vähennetty lasketuista tuloksista. Kolmiomittauksessa 3 metrin etäisyydellä saatu tulos on huomattavasti oletettua hautaus­syvyyttä suurempi, koska määritetyt kulmat ovat huomattavasti suuremmat kuin 45 astetta. Mittaus­pisteiden välisellä etäisyydellä  $l = 5$  m saatu tulos on kuitenkin lähempänä oletettua hautaus­syvyyttä. Hautaus­syvyyden mittaus ja määrittäminen on kuitenkin hyvin hankalaa, koska kaapelit sijaitsevat lähekkäin toisiaan. Lisäksi mittaus­pisteet mit­taavat eri kaapeleita, mikä aiheuttaa myös virhettä mit­taustulokseen. Taulukossa 6.2 esitetyn mitatun hautaus­syvyyden virhemarginaalissa ei oteta huomioon syvyy­slaskennan oletusta siitä, että mittaus­piste sijaitsisi aina 45 asteen kulmassa mitattavaan kaapeliin nähden.

**Taulukko 6.2.** EstLink 1 -kaapeleiden oletettu ja mitattu hautaus­syvyys DC-hallin läheisyydes­sä sijaitsevan aidan lähellä liitteen C mittaus­alueella mittaus­pisteiden etäisyyksillä  $l = 3,0$  m ja  $l = 5,0$  m.

Mittaus­alue	Oletettu hautaus­syvyys (m)	Mitattu hautaus­syvyys (m)	
		$l = 3,00$ m $\pm$ 0,10 m	$l = 5,00$ m $\pm$ 0,10 m
Aidan lähellä	0,80 $\pm$ 0,20	2,00 $\pm$ 0,08	1,09 $\pm$ 0,03

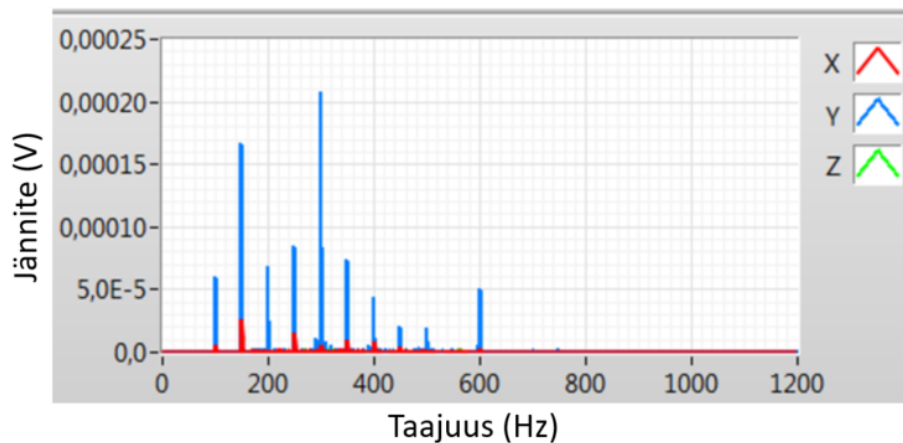
EstLink 1 -kaapeleiden paikantaminen onnistui hyvin, mutta puutteelliset tiedot kaapeleiden asennuksista hankaloittivat mit­tausten tulkitsemista. Lisäksi mittaus­alueella oleva lumi hankaloitti magnetometrin kuljettamista kaapelireitillä ja sen pitämistä vakaana mit­tauksen aikana. Vikatilanteessa kaapelin paikantaminen on huomattavasti helpompaa, koska tällöin molemmat kaapelit ovat pois käytöstä. Tällöin voidaan syöttää tietyn­taajuinen virta molempiin kaapeleihin, jolloin ne voidaan erotella eri taajuuden perusteella. Haluttaessa virta voidaan syöttää vain yhteen kaapeliin, jolloin toisen kaapelin magneet­tikenttä ei vaikuta muodostuvaan magneettikenttään ja siten mit­taustulokseen. Etenkin yhteyden merikaapeliosuudella, magneettikenttien kumoutuminen on vielä suurempaa, koska kaapelit on niputettu yhteen. Vianpaikannus voidaan myös tehdä syöttämällä molempiin kaapeleihin amplitudiltaan yhtä suurta, mutta taajuuksiltaan erisuurta virtaa, ja verrata niiden muodostamia magneettikenttiä keskenään. Tällöin magnetometrin ja kaa­peleiden välisen etäisyyden muutos ei aiheuta väärää tulkitsemista paikannustulokseen.

## 6.4 EstLink 2

EstLink 2 -kaapelin paikantaminen suoritettiin Nikuvikenissä kaapelipääteaseman lähel­lä ja kaapelireitin varrella olevan Nikubyntien risteämän kohdalla liitteen D mukaisesti.

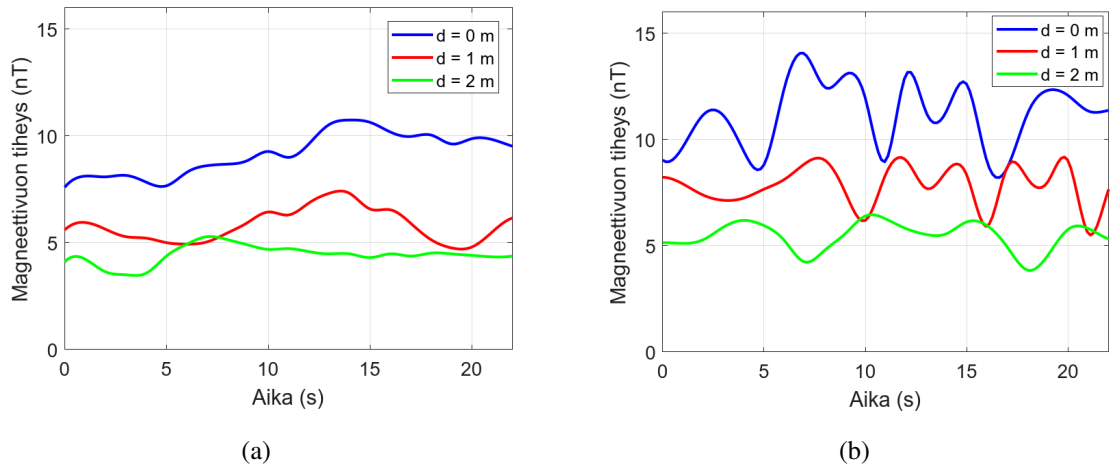
Kaapeli paikannettiin harmonisten yliaaltovirtojen muodostamien magneettivuon tiheyksien avulla. Kaapelipääteaseman lähellä kaapelin oletettu hautausvyvyys on 1,3–1,5 metriä ja tien kohdalla 2,0–2,5 metriä. Mittaaminen suoritettiin ajalta, jolloin johtimien DC-erovirta  $I_{\text{encl}}$  oli noin 1 A ja mittausten näytteistystaajuutena käytettiin 1 Hz [68].

Kuvassa 6.8 on esitetty kaapelin yhden mittaushetken aikainen taajuusspektri suodatetusta tuloksesta. Taajuusspektristä nähdään, että LCC-yhteydellä tasasuuntauksesta aiheutuvan 300 Hz harmonisen yliaaltovirran muodostaman magneettikentän indusoima jännite on suurin havaituista taajuuksista ja käytössä oleva kaapeli paikannetaan sen avulla.



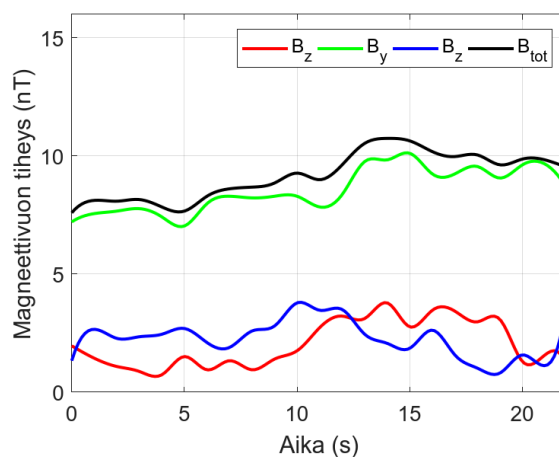
**Kuva 6.8.** EstLink 2 -kaapelin harmonisten yliaaltovirtojen muodostamien magneettikenttien magnetometriin indusoimat jännitteet yhden mittaushetken aikana suodatetusta tuloksesta, kun johtimien DC-erovirta  $I_{\text{encl}}$  on noin 1 A [68].

Kuvassa 6.9(a) ja 6.9(b) on esitetty kaksi eri mittaussarjaa kaapelipääteaseman lähellä suoritetuissa mittauksissa, kun magnetometriä on kuljetettu kaapelireittiä pitkin (kuva 6.1(a)) kolmella eri korkeudella  $d$  maanpinnasta. Kuvista 6.9(a) ja 6.9(b) voidaan huomata, että magneettivuon tiheyden amplitudi on suurin, kun magnetometrin etäisyys kaapelista on pienin ja toisinpäin. Kuvista voidaan myös huomata, että magnetometri on hyvin herkkä häiriöille, kun mitataan erittäin pieniä magneettikenttiä. Magnetometrin etäisyyden vaihtelu kaapelista ja kävelijän kulkunopeuden vaihtelu aiheuttavat häiriöitä mittaustuloksiin, mikä voidaan huomata etenkin kuvasta 6.9(b). Tästä johtuen energisoimattomaan kaapeliin syötettävän virran amplitudi tulee olla riittävän suuri, jotta mitattava magneettikenttä saadaan mahdollisimman suureksi. Vianpaikannuksessa kuvan 6.9(b) kaltaisesta mittaustuloksesta olisi erittäin vaikeaa erottaa vikakohta, jos mitattavan magneettikentän amplitudi vaihtelee kuvan osoittamalla tavalla.



**Kuva 6.9.** EstLink 2 -kaapelin harmonisten yliaaltovirtojen muodostamat magneettivuon tiheyden kokonaisarvot kulkemalla kaapelireittiä pitkin (kuva 6.1(a)) kolmelta eri korkeudelta  $d$  maanpinnasta, ja kun mitattu matka  $l = 10$  m a) mittaussarja 1 b) mittaussarja 2.

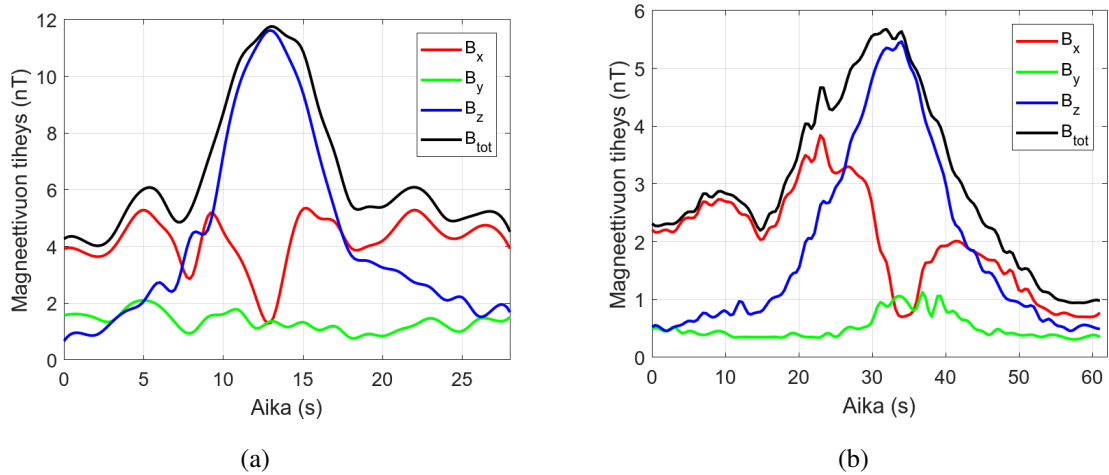
Kuvassa 6.10 on esitetty magneettivuon tiheyden komponentit ja kokonaisarvo kuvan 6.9(a) mittauksesta, kun magnetometrini etäisyys maanpinnasta  $d = 0$  m. Kuvassa 6.10 kaapelin magneettikentän suuntainen komponentti ( $B_y$ ) on lähes kokonaisarvon suuruinen muiden komponenttien ollessa hyvin pieniä, jolloin magnetometri on kulkenut lähes kohtisuoraan kaapelin yläpuolella. Magnetometrini kiertyminen akseliensa suhteen aiheuttaa muutoksia havaittuihin magneettivuon tiheyden komponentteihin, mutta kokonaisarvo pysyy samana, jos etäisyys magnetometrini ja kaapelin välillä ei muutu. Vianpaikannuksessa ennen vikaa on hyvä saada kuvan 6.10 kaltainen mittaustulos, jos kuljetaan kaapelireittiä pitkin, koska tällöin pieniresistanssisen rinnakkaisvian aiheuttama muutos saadaan huomattua helpommin.



**Kuva 6.10.** EstLink 2 -kaapelin magneettivuon tiheyden komponentit ja kokonaisarvo kuvan 6.9(a) mittaussarjasta, kun etäisyys maanpinnan tasosta  $d = 0$  m ja mitattu matka  $l = 10$  m.

Kuvassa 6.11 on esitetty mittaustulokset kun kuljetaan poikkisuunnassa kaapelin ylitse (kuva 6.1(b)) kaapelipääteaseman lähellä (kuva 6.11(a)) ja tien kohdalla (kuva 6.11(b)).

Kaapeli sijaitsee kohtisuoraan magnetometrin alapuolella, kun magneettivuon tiheyden kokonaisarvo  $B_{\text{tot}}$  saavuttaa maksimin ja kohtisuorassa kaapelin nähden oleva komponentti  $B_x$  magneettivuon tiheyden minimin. Kaapelin suuntaisesti oleva komponentti  $B_y$  on lähes nolla koko mittauksen ajan, koska se sijaitsee kaapelin suuntaisesti. Tien kohdalla tehdyissä mittauksissa magneettivuon tiheys on pienempi maksimin oikealla puolella (ajallisesti myöhemmin), koska tien korkeus muuttui mittausreitillä, jolloin etäisyys kaapeliin oli suurempi kaapelin ylityksen jälkeen kuin ylitystä ennen.



**Kuva 6.11.** Kaapelin paikantaminen kulkemalla poikisuunnassa kaapelin ylitse a) kaapelipääteaseman lähellä, kun mitattu matka  $l = 10$  m b) tien kohdalla, kun mitattu matka  $l = 20$  m.

Kuvan 6.11(a) magneettivuontiheyden huippuarvosta ja oletusta kaapelin hautausyvyvyydestä saadaan määritettyä kaapelissa kulkevien harmonisten yliaaltovirtojen arvoksi noin 0,1 A kaavan (5.2) mukaisesti. Vianpaikannuksessa kaapeliin syötettävän virran amplitudi on yleensä kymmeniä kertoja suurempi [4, 43], jolloin paikannettava signaali on suurempi ja mahdollisten häiriöiden vaikutus pienempi.

Kaapelin hautausyvyvyys määritettiin kaapelipääteaseman lähellä ja tien kohdalla kahdella eri mittauspisteiden välisellä etäisyydellä  $l = 3$  m ja  $l = 5$  m. Taulukossa 6.3 on esitetty kaapelin oletetut hautausyvyvydet ja kolmiomittauksen avulla määritetyt hautausyvyvydet kaapelipääteaseman lähellä ja tien kohdalla. Magnetometrin ja kaapelin väliset kulmat maanpintaan nähden on laskettu kymmenen mittausarvon keskiarvolla ja laskennassa on huomioitu  $\pm 0,1$  metrin arvioitu virhemarginaali mittauspisteiden väliseen etäisyyteen.

Taulukosta 6.3 voidaan huomata, että kolmiomittauksella saadut tulokset ovat lähellä oletettua hautausyvyvyyttä. Kaapelipääteaseman lähellä mittaustulos on lähempänä oletettua, kun magnetometriä välinen etäisyys  $l = 3$  m, koska mittauksista määritetyt kulmat ovat lähellä 45 astetta. Suuremmalla etäisyydellä  $l$  määritetyt kulmat pienenevät, jolloin myös mittaustulokseen aiheutuu virhettä. Tien kohdalla mittaustulos on lähempänä oletettua, kun mittauspisteiden välinen etäisyys  $l = 5$  m, koska tällöin mittauksessa kulmat ovat lähellä 45 astetta. Pienemmällä etäisyydellä  $l$  määritetyt kulmat ovat huomattavasti

suuremmat kuin 45 astetta, jolloin mittaustulokseen aiheutuu enemmän virhettä. Taulukossa ei ole huomioitu 45 asteen poikkeavuudesta aiheutuvaa epätarkkuutta.

**Taulukko 6.3.** EstLink 2 -kaapelin oletetut ja kolmiomittauksella määritetyt hautausvyvydet kaapelipääteaseman lähellä ja tien kohdalla mittauspisteiden etäisyyksillä  $l = 3,0$  m ja  $l = 5,0$  m.

Mittausalue	Oletettu hautausvyvyys (m)	Mitattu hautausvyvyys (m)	
		$l = 3,00$ m $\pm$ 0,10 m	$l = 5,00$ m $\pm$ 0,10 m
Kaapelipääteasema	1,40 $\pm$ 0,10	1,57 $\pm$ 0,05	1,76 $\pm$ 0,04
Tieosuus	2,35 $\pm$ 0,15	2,78 $\pm$ 0,08	2,17 $\pm$ 0,04

EstLink 2 -kaapelin paikannus onnistui hyvin, vaikka havaittava signaali oli pieni ja vianpaikannuslaitetta käytettiin ensimmäistä kertaa suurjännitekaapelin paikantamisessa. Lumi ja jää aiheuttivat vaikeuksia kaapelireitillä kulkemiseen, minkä lisäksi huonot sääolosuhteet hankaloittivat kaapelin paikantamista. Mittaustulosten tulkitseminen oli kuitenkin selvästi helpointa, koska kaapelin asennussyvyydestä kaapelireitin varrella oli parhaimmat tiedot verrattuna muihin työssä käsiteltäviin yhteyksiin. Lisäksi tulkitsemista helpotti, että yhteys muodostui vain yhdestä kaapelista, jolloin paikantamiseen ei vaikuttanut toisen kaapelin muodostama magneettikenttä.



## 7. JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOKEHITYS

Tässä luvussa käsitellään magneettikentän mittaukseen perustuvan menetelmän soveltuvuutta Fingridin HVDC-kaapeleiden tarkkaan vianpaikannukseen. Soveltuvuuden arvioinnissa hyödynnetään luvussa 5 käsiteltyä teoriaa ja luvussa 6 käsiteltyjä mittaustuloksia. Lisäksi arvioidaan Aquadyne-kaapelivianpaikannuslaitteen käyttömahdollisuutta menetelmässä, ja miten laitetta käytettäisiin oikean kaapelivian paikannuksessa. Luvussa pohditaan myös millä karkeilla ja tarkoilla vianpaikannusmenetelmillä kaapelivikaa voitaisiin paikantaa eri kaapeleilla ja vikatilanteissa, ja siten parantaa vianpaikannusprosessia. Lisäksi luvussa esitetään mahdollisia jatkotutkimusaiheita tämän työn jatkoksi.

### 7.1 Magneettikentän mittauksen soveltuvuus tarkkaan vianpaikannukseen

Luvussa 5 käsitellyn teorian ja luvun 6 mittaustulosten perusteella magneettikentän mittaukseen perustuvaa menetelmää voidaan käyttää kaikilla Fingridin kaapeleilla pieniresistanssisten rinnakkaisvikojen ja vaippavikojen tarkkaan vianpaikannukseen. Teoriassa myös suuriresistanssisen rinnakkaisvian tarkka vianpaikannus on mahdollista, mutta käytännössä pienen magneettivuon tiheyden muutoksen erottaminen kaapeliviassa voi kuitenkin olla hankalaa, jolloin riski vianpaikannuksen epäonnistumiseen tai pitkittymiseen kasvaa.

Tarkan vianpaikannuksen suorittaminen magneettikenttiä mittaamalla edellyttää tietyn taajuisen signaalin syöttämistä kaapeliin. Tasavirran syöttäminen kaapeliin ei ole kannattavaa, koska maan magneettikenttä on hyvin suuri verrattuna kaapeliin syötettävän signaalin muodostamaan magneettikenttään ja signaalin aiheuttaman magneettikentän muutoksen havaitseminen siten hankalaa. Syötettävän signaalin tulee olla riittävän pienitaajuinen, jotta minimoidaan signaalin vaimentuminen kaapelissa ja varmistetaan riittävä signaalin voimakkuus koko kaapelipituudelle. Riittävän suurella signaalin amplitudilla minimoidaan häiriölähteiden vaikutus mittaustulokseen. Häiriölähteiden indusoimat jännitteet tulee suodattaa mittaustuloksesta siten että vianpaikannuksessa syötettävä signaali nähdään selkeästi suurimpana taajuusspektrissä.

Magneettikentän mittaukseen perustuvalla menetelmällä tarkka vianpaikannus merellä on hyvä suorittaa matalissa vesissä (syvyys alle 10 m) vedenpinnan yläpuolelta veneestä,

mutta tätä syvemmillä ROV:n käyttäminen on teknisesti paras vaihtoehto. Mittalaitteen kulkunopeus on hyvä pitää mahdollisimman vakiona, jotta saatava mittaustulostieto on mahdollisimman hyvä. Tästä johtuen sukeltajan käyttäminen ei ole paras vaihtoehto, koska sukeltajan kulkunopeus voi vaihdella kaapelireitin varrella. Lisäksi sukeltajalla ei saada välttämättä tutkittua vika-aluetta yhtäjaksoisesti, koska sukeltajan tulee käydä välillä pinnalle. Tämän vuoksi mahdollinen vika-alue voidaan epähuomiossa ohittaa, jos mittauksia ei jatketa siitä kohdasta mihin jäätiin. Maalla magneettikentän mittaukseen perustuvalla menetelmällä on hankala suorittaa, koska kaapelireiteillä on usein hankala kulkea, mikä vaikuttaa suoraan saatavaan mittaustulokseen. Tästä johtuen vianpaikannuksessa on välttämätöntä olla kulkuneuvo, jolla pystyttäisiin tasaisesti kulkemaan kaapelireitillä ja tulkitsemaan samalla mittaustulosta. Kulkuneuvolla mittalaitteen kulkunopeus pystytään pitämään mahdollisimman vakiona, minkä lisäksi mittalaite pystytään pitämään paremmin vakaana mittauksen ajan toisin kuin kävelijällä. Lisäksi Aquadyne-kaapelivianpaikannuslaite vaatii kulkuneuvon, jotta vianpaikannus pystytään suorittamaan jatkuva-aikaisesti.

## 7.2 Vianpaikannuslaitteen soveltuminen ja jatkokehitystarpeet

Käytössä olevan kaapelin paikantaminen onnistuu nykyisellä Aquadyne-vianpaikannuslaitteella. Vianpaikannuslaitteen käyttäminen vianpaikannukseen edellyttää signaaligeneraattoria, jolla voidaan syöttää jatkuva-aikaista, taajuudeltaan 20–30 Hz ja amplitudiltaan vähintään 1 A signaalia. Signaaligeneraattorin hankinnan yhteydessä tulisi selvittää, miten signaaligeneraattori kytketään eri kaapeleihin ja minkälainen signaali tulee syöttää, jotta se olisi havaittavissa karkean vianpaikannuksen rajaamalta alueelta. Signaaligeneraattorissa olisi hyvä olla vähintään kaksi kanavaa, jolloin EstLink 1 -kaapeliviassa voitaisiin syöttää myös ehjään kaapeliin signaali. Tällöin vikaantuneen kaapelin muodostama magneettikenttä voitaisiin verrata ehjän kaapelin magneettikenttään ja siten helpottaa vianpaikannusta. Lisäksi EstLink 2 -kaapelin paluupiirin maasulussa pääjohtimeen ja paluujohtimeen voitaisiin syöttää kaksi taajuudeltaan erisuurta signaalia. Oman signaaligeneraattorin hankinnan sijasta saatavuus voidaan varmistaa myös tekemällä kolmannen osapuolen kanssa valmiussopimus signaaligeneraattorin toimituksesta vian yhteydessä. Lisäksi voidaan tehdä valmiussopimuksia, joilla varmistetaan laivan, ROV:n tai sukeltajien nopea saatavuus kaapelivikatilanteissa.

Signaaligeneraattorin hankinnan tai valmiussopimuksen myötä kaapelivika voidaan paikantaa laitteiston nykyisellä kokoonpanolla kulkemalla siksakkia kaapelireitillä ja tallentamalla aina kohtisuoraan sekä kaapelin läheisyydessä olevia arvoja. Magneettivuon tiheyden komponentteja tarkkailemalla voidaan paikallistaa kohtisuoraan kaapelin yläpuolella oleva magneettivuon tiheyden arvo ja verrata sitä edelliseen kaapelin ylityksestä mitattuun arvoon. Nykyisellä kokoonpanolla ei kuitenkaan saada tietoa mahdollisesta hautausvyvyyden muutoksesta, mikä suurentaa vianpaikannuksen kustannusriskejä. Tä-

män vuoksi Aquadyne-kaapelivianpaikannuslaitteeseen olisi hyvä hankkia toinen magnetometri, koska nykyisellä kokoonpanolla ei saada tietoa magnetometrin etäisyydestä kaapeliin. Luvussa 6 saatujen hautaussyvyysmittausten perusteella kahta magnetometriä voidaan käyttää työssä tutkittujen kaapeleiden hautaussyvyyden määrittämiseen, mutta hautaussyvyyden laskenta vaatii kehitystä [46]. Toisen magnetometrin myötä kaapelivika voitaisiin paikantaa kulkemalla kaapelireitti pitkin, jolloin säästettäisiin mahdollisesti vianpaikannukseen kuluva aikaa.

Magneettikentän mittaukseen perustuvan menetelmän ja vianpaikannuslaitteen luotettavuuden parantamiseksi nähdään tarpeelliseksi järjestää vianpaikannusharjoitus, jotta saataisiin kokemuksia ja mittaustuloksia oikean kaapelivian paikantamisesta sekä tietoa menetelmän ja laitteiston tarkkuudesta. Vianpaikannusharjoitus kehittäisi vianpaikannuslaitteen käyttötaitoa ja parantaisi vianpaikannusprosessia. Kaapelivika voitaisiin esimerkiksi keinotekoisesti tehdä keskijännitekaapeliin tai HVDC-kaapeliin, jota paikannettaisiin sopivalla koekentällä. Koekenttä tulisi olla sekä maalla että merellä, jotta laitteiston eri käyttötavoista saataisiin kokemusta. Vianpaikannusharjoituksessa tulisi käydä läpi ainakin:

- signaalin syöttäminen kaapeliin
- magnetometrien sijoittelu eri käyttötavoissa
- vian paikantaminen eri käyttötavoilla merellä ja maalla
- mittausdatan yhdistäminen GPS-sijaintiin
- mittausetäisyyden ja -nopeuden vaihtelun vaikutus mittaustulokseen

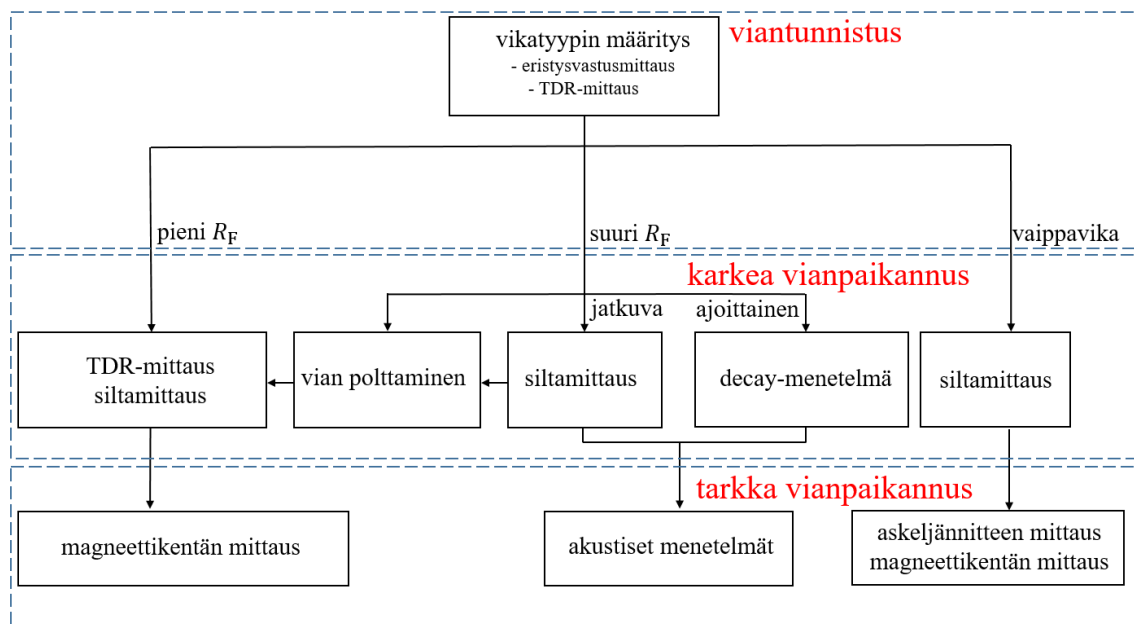
Magnetometrin kuljettajana tulisi ainakin käyttää ROV:a, sukeltajaa ja venettä merellä. Etenkin ROV:a käytettäessä olisi tärkeä varmistaa kaapelivianpaikannuslaitteen sijoittelu ja yhteensopivuus ROV:n kanssa sekä varmistaa ROV:n riittävä varustelutaso, jota on käsitelty tarkemmin luvussa 5.5.3. Vianpaikannuslaitteen mittausrvojen yhdistäminen sen hetkiseen GPS-sijaintiin maalla ja merellä on oleellista, jotta mittaustuloksen tulkinta on helpompaa. Tulos olisi hyvä esittää havainnollisesti, esimerkiksi kuvan 5.6 kaltaisessa muodossa. Tällöin saatua mittaustulosta voidaan tutkia myös mittauksen jälkeen.

### 7.3 Vianpaikannusprosessin kehittäminen

Fingridin vianpaikannusprosessia voitaisiin kehittää tutkimalla muita karkeita ja tarkkoja vianpaikannusmenetelmiä tarkemmin ja arvioida niiden sopivuutta Fingridin HVDC-kaapeleiden vianpaikannukseen. Nykyistä TDR-mittauksella tehtävää karkeaa vianpaikannusta voitaisiin täydentää tutkimalla siltamittauksen sopivuutta ja tarkkuutta Fingridin

kaapelivoioissa eri yhteyksillä. Suuriresistanssisen rinnakkaisvian tarkka paikantaminen on hankalaa magneettikentän mittaukseen perustuvalla menetelmällä, joten voitaisiin tutkia muiden tarkkojen vianpaikannusmenetelmien sopivuutta suuriresistanssisen rinnakkaisvian paikantamiseen.

Kuvassa 7.1 on esitetty Fingridin vianpaikannusprosessiin kehitysidea, jolla voitaisiin laajentaa nykyistä vianpaikannusprosessia uusien karkeiden ja tarkkojen menetelmien avulla. Viantunnistuksessa voitaisiin TDR-mittauksen lisäksi käyttää eristysvastusmittausta, jolla saataisiin tietoa vikaresistanssin suuruudesta, minkä perusteella voitaisiin valita sopivin menetelmä. Pieniresistanssisten rinnakkaisvikojen karkeassa vianpaikannuksessa on hyvä käyttää edelleen TDR-mittausta, lukuun ottamatta EstLink 2 -kaapelin paluupiirin maasulkua, jossa siltamittaus voi olla tarpeen. Siltamittausta voitaisiin käyttää myös yleisimmin toisena karkeana vianpaikannusmenetelmänä, jolla mahdollisesti varmistettaisiin karkeassa vianpaikannuksessa saatu tulos. Pieniresistanssisen rinnakkaisvian tarkkana vianpaikannusmenetelmänä voidaan käyttää magneettikentän mittaukseen perustuvaa menetelmää sekä maalla ja merellä.



**Kuva 7.1.** Vianpaikannusprosessin kehittäminen viantunnistuksen, karkean vianpaikannuksen ja tarkan vianpaikannuksen kannalta.

Suuriresistanssisten rinnakkaisvikojen karkea vianpaikannus voidaan suorittaa siltamittauksella tai decay-menetelmällä, jos vika on ajoittainen. Fenno-Skan-kaapeleilla ja EstLink 2 -kaapelilla suuriresistanssinen vika voidaan polttaa pieniresistanssiseksi, mutta EstLink 1 -kaapelilla vian polttaminen pieniresistanssiseksi ei välttämättä onnistu. Suuriresistanssisen rinnakkaisvian tarkkana vianpaikannusmenetelmänä voidaan käyttää akustisia menetelmiä. Kaapelin vaippavikojen karkeana vianpaikannusmenetelmänä voidaan käyttää siltamittausta ja tarkkana vianpaikannusmenetelmänä askeljännitteen tai magneettikentän mittaukseen perustuvaa menetelmää.

## 8. YHTEENVETO

Tasasähköyhteyden kaapelin vikaantuminen aiheuttaa aina pitkän pakotetun keskeytyksen maiden väliseen sähkönsiirtoon, mikä heikentää kantaverkon toimintavarmuutta ja sähkömarkkinoiden toimintaa. Käynnissä oleva energiajärjestelmän murros kasvattaa entisestään tarvetta tasasähköyhteyksien hyvälle luotettavuudelle ja käytettävyydelle, jolloin kaapelivian nopealla ja tarkalla paikantamisella varmistetaan yhteyden siirtokapasiteetin saaminen mahdollisimman nopeasti takaisin käyttöön. Samalla mahdollistetaan vian aiheuttamien kansantaloudellisten vaikutusten, suorien kustannusten sekä epäsuorien kustannusten minimointi.

Kaapelin vianpaikannuksessa suoritetaan ensin karkea vianpaikannus, jolla pyritään rajaamaan todennäköinen vikapaikka mahdollisimman pienelle alueelle suhteessa kaapelin kokonaispituuteen. Karkealla vianpaikannuksella rajatulla alueella suoritetaan tämän jälkeen tarkka vianpaikannus, jolla pyritään määrittämään vian täsmällinen sijainti. Kaapelin tarkka vianpaikannus on tyypillisesti hidasta, minkä vuoksi karkealla vianpaikannuksella on hyvin suuri merkitys tarkan vianpaikannuksen nopeuteen ja onnistumiseen.

Työssä havaittiin, että Fingridin nykyisessä vianpaikannusprosessissa on puutteita johdun käytössä olevan karkean vianpaikannusmenetelmän rajoitteista kaikkien mahdollisten vikojen paikantamiseen. Tästä esimerkkinä on EstLink 2 -kaapelin paluupiirin maasulku, mitä ei välttämättä saada paikannettua TDR-mittauksella. Toisena esimerkkinä on EstLink 1 -kaapelin suuriresistanssinen rinnakkaisvika, jota ei välttämättä saada poltettua pysyvästi pieniresistanssiseksi, jolloin TDR-mittauksella ei välttämättä havaita vikapaikkaa. Nykyistä vianpaikannusprosessia voidaankin helposti parantaa ottamalla käyttöön useampi karkean vianpaikannuksen menetelmä, jolloin parannetaan vianpaikannuksen kattavuutta. Käyttämällä useampaa menetelmää yhden vian paikantamiseen saadaan tutkittava alue todennäköisesti rajattua pienemmäksi, jolloin myös tarkkaan vianpaikannukseen kuluva aika yleensä lyhenee, koska tutkittava alue pienenee.

Fingridillä kaapelivikojen tarkkaan vianpaikannukseen ei nykyisin ole käytössä yhtä vakiintunutta menetelmää samaan tapaan kuin karkeassa vianpaikannuksessa käytettävä TDR-mittaus. Aiemmin käytössä olleiden tarkkojen vianpaikannusmenetelmien soveltuvuudesta eri kaapeleille ja kaapelivioille ei ole luotettavaa tietoa, mikä kasvattaa riskiä vianpaikannuksen epäonnistumiseen tai pitkittymiseen, jos menetelmä ei olekaan kyseiselle vialle sopiva. Kaapelin katkaiseminen karkeassa vianpaikannuksessa määritetyllä

tuloksella aiheuttaa myös huomattavan kustannusriskin, koska kaapeli voidaan katkaista hyvin kaukaa vikapaikasta. Vian tarkalla paikantamisella pyritään varmistamaan kaapelivian sijainti, jotta vioittunut osuus saadaan luotettavasti poistettua ja korvattua mahdollisimman kustannustehokkaasti.

Työssä tarkasteltiin magneettikentän mittaukseen perustuvaa menetelmää yhtenä mahdollisena tarkkana vianpaikannusmenetelmänä. Menetelmässä kaapeliin syötetään pienitaajuista vaihtovirtasignaalia, jonka synnyttämää magneettikenttää mitataan magneettikenttää mittaavalla sensorilla eli magnetometrillä. Kaapelivika voidaan paikantaa kohtaan, jossa havaitaan muutos magneettikentässä ennen vikaa ja sen jälkeen. Muutoksen suuruus on riippuvainen kaapelin vikaresistanssin suuruudesta, minkä vuoksi pieniresistanssisen rinnakkaisvian aiheuttama muutos havaitaan helpoiten. Tarkan vianpaikannuksen onnistuminen tällä menetelmällä edellyttää kuitenkin häiriöiden poistamista ja minimoimista, jotta kaapeliin syötettävän virran taajuus nähdään suurimpana magnetometriin indusoituneena jännitteenä taajuusspektrissä. Suurimpia häiriölähteitä ovat magnetometrin lähellä olevat magneettiset materiaalit, maan magneettikenttä ja lähellä olevat muut kaapelit tai avojohdot. Menetelmä ei vaadi kaapelin kaivamista tai nostamista esiin vian havaitsemiseksi, mikä säästää vianpaikannukseen kuluvaan aikaan ja kustannuksiin.

Fingridin magneettikentän mittaukseen sopivan vianpaikannuslaitteiston soveltuvuutta kaapeleiden tarkkaan vianpaikannukseen arvioitiin paikantamalla käytössä olevia kaapeleita eri mittaustavoilla. Kaapeleita paikannettiin tasavirran ja pääasiassa vaihtosuunnassa tasavirrassa esiintyvän 300 Hz yliaaltovirran muodostaman magneettikentän avulla. Häiriötaajuuksien suodattaminen onnistui hyvin ja 300 Hz harmonisen taajuuden indusoima jännite nähtiin taajuusspektrissä voimakkaimpana. Myös kaapeleiden paikantaminen tasavirran muodostaman magneettikentän avulla onnistui hyvin. Magnetometriin indusoituneiden jännitteiden perusteella voidaan esimerkiksi helposti päätellä, milloin ollaan kohtisuoraan kaapelin yläpuolella. Kaapelin ja magnetometrin välisellä etäisyydellä on suuri vaikutus mittaustulokseen ja luotettavin tulos saavutetaan, kun ollaan mahdollisimman lähellä kaapelia. Lisäksi on tärkeää tietää magnetometrin ja kaapelin välinen etäisyys, jotta vianpaikannuksessa vikaa ei virheellisesti paikanneta sijaintiin, jossa todellisuudessa vain esimerkiksi kaapelin hautausvyvyys muuttuu.

Kaapelivian paikantaminen nykyisellä Aquadyne-kaapelivianpaikannuslaitteella ei ole kuitenkaan kovin luotettavaa ilman signaaligeneraattoria ja toista magnetometriä. Kaapeliin tulee syöttää vähintään amplitudiltaan 1 A suuruista jatkuva-aikaista vaihtovirtasignaalia, koska tasavirran muodostaman magneettikentän erottaminen maan magneettikentästä on hyvin hankalaa. Signaalin tulee olla riittävän pienitaajuinen, 20–30 Hz, jotta minimoidaan signaalin vaimentuminen kaapelissa ja varmistetaan signaalin havaittavuus kaapelin toisesta päästä. Magnetometrin ja kaapelin välistä etäisyyttä voidaan mitata kahdella magnetometrillä, jolloin vika pystytään paikantamaan yhtä magnetometriä luotettavammin.

Työn lopputuloksena voidaan sanoa, että magneettikentän mittaukseen perustuvalla menetelmällä voidaan paikantaa luotettavasti Fingridin kaapeleiden pieniresistanssiset rinnakkaisviat. Menetelmä on osoitettu toimivaksi HVDC-kaapelin tarkkaan vianpaikannukseen oikeassa kaapeliviassa, mutta juuri työssä käsiteltyä Aquadyne-kaapelivianpaikannuslaitetta ei ole vielä käytetty oikean kaapelivian paikantamiseen. Käyttökokemusten saamiseksi laitteistolla tulisikin järjestää erillinen vianpaikannusharjoitus, jossa harjoiteltaisiin oikean kaapelivian paikantamista Aquadyne-kaapelivianpaikannuslaitteella erilaisissa tilanteissa. Lisäksi Fingridin tulisi tutkia ja ottaa käyttöön uusia karkeita vianpaikannusmenetelmiä, kuten resistanssisiltamittaus, joilla saataisiin varmistettua ja mahdollisesti rajattua todellista kaapelivian aluetta.

## LÄHTEET

- [1] T. Rauhala, P. Jeberg, E. Thurnberg, D. Ingemansson, O. Skogheim, H. Assefa, Assessment of Nordic HVDC operation and maintenance practices on reliability and availability of HVDC systems, CIGRE, Pariisi, Ranska, 2018. Saatavissa <https://e-cigre.org>
- [2] M. Bawart, M. Marzinotto, G. Mazzanti, Challenge of Fault Location on Long Submarine Power Cables, Jicable'15 - 9<sup>th</sup> International Conference on Insulated Power Cables, Versailles, Ranska, 2015.
- [3] P. Lindblad, Reliability on existing HVDC links feedback, CIGRE, Ranska, Pariisi, 2018, s.96-103. Saatavissa <https://e-cigre.org/publication/CSE011-cse-011>
- [4] J. Chaniolleau, RTE kaapeleiden vianpaikannuksen tutkimus ja tuotekehityksen projektipäällikkö. Haastattelu, Aihe: Vianpaikannusprosessi ja vianpaikannusmenetelmät, 5.12.2018.
- [5] J. Charvet, Asset management of submarine cables and lessons learned from a repair, CIGRE, Ranska, Pariisi, 2018, s.104-109. Saatavilla <https://e-cigre.org/publication/CSE011-cse-011>
- [6] Megger, Fault Finding solutions, 2003. Saatavissa (viitattu 10.11.2018) [http://www.unitronics-electric.com/pdf/articulos/FaultFindingBook\\_AG\\_en\\_V03.pdf](http://www.unitronics-electric.com/pdf/articulos/FaultFindingBook_AG_en_V03.pdf)
- [7] J. Rantanen, HVDC-kaapeli erikoisasiantuntija, Fingrid, Helsinki. Haastattelu, useita ajankohtia.
- [8] J. Elovaara, L. Haarla, Sähköverkot I: järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta, Otatieto, Helsinki, 2011.
- [9] J. Elovaara, L. Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, Otatieto, Helsinki, 2011.
- [10] ABB Grid Systems, HVDC perusteet, Powerpoint esitys. Rajoitettu saatavuus.
- [11] Siemens AG, High Voltage Direct Current Transmission, Siemens AG, 2011. Saatavissa (viitattu 17.1.2019) [https://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/HVDC/HVDC\\_Proven\\_Technology.pdf](https://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/HVDC/HVDC_Proven_Technology.pdf)
- [12] Y. Murata, K. Abe. M. Suizu, S. Mashio, O. Matsunaga, S. Asai, S. Katakai, HVDC XLPE Cable Systems Applicable for Higher Temperature and Polarity Reversal Operation, Jicable'11 - 8<sup>th</sup> International Conference on Insulated Power Cables, Versailles, Ranska, 2011.



- [13] Fingrid Oyj, HVDC-yhteydet ArcGIS-karttatietojärjestelmässä. Rajoitettu saatavuus (viitattu 10.12.2018).
- [14] H. Nurminen, Fenno-Skan 1 ja 2, PowerPoint -esitys. Rajoitettu saatavuus.
- [15] D. Ingemansson, T. Kiiveri, H. Nurminen, B. Pääjärvi, K. Danielsson, New Fenno-Skan 2 HVDC pole with an upgrade of the existing Fenno-Skan 1 pole, CIGRE, Pariisi, Ranska, 2012. Saatavissa <https://e-cigre.org>
- [16] L. Ronström, M. Hoffstein, R. Pajo, M. Lahtinen, The Estlink HVDC Light Transmission System, CIGRE, Tallinna, Viro, 2007. Saatavissa <https://e-cigre.org>
- [17] M. Aro, J. Elovaara, M. Karttunen, K. Nousiainen, V. Palva, Suurjännitetekniikka, Otatieto, Helsinki, 2013.
- [18] Fingrid, Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2017-2027, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 8.11.2018) <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/kantaverkon-kehittamissuunnitelma-2017-2027.pdf>
- [19] Fingrid Oyj, Kantaverkko kehittyy: Fenno-Skan 2 -tasasähköyhteys, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 25.9.2018) [https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/fennoskan\\_esite\\_suomi\\_low.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/fennoskan_esite_suomi_low.pdf)
- [20] T. Rauhala, M. Laasonen, J. Kilter, Smooth coordination and management of impact of EstLink 2 transmission testing on electricity markets, power system operations and system technical performance, CIGRE, Pariisi, Ranska, 2016. Saatavissa <https://e-cigre.org>
- [21] Energiateollisuus ry, Energiavuosi 2013-2017, Energiateollisuus ry, 2014-2018. Verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 18.1.2019) [https://energia.fi/ajankohtaista\\_ja\\_materiaalipankki/materiaalipankki/sahkotase\\_1970-2017.html#material-view](https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/sahkotase_1970-2017.html#material-view)
- [22] ENTSO-E, Nordic and Baltic HVDC Utilisation and Unavailability Statistics 2013-2017, ENTSO-E, 2012-2018. Verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 18.1.2019) <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/sahkon-siirtovarmuus/raportit/#pohjoismainen-vika--ja-hairiotilasto>
- [23] Fingrid Oyj, Siirtojenhallinta, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.10.2018) <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/siirtojenhallinta/>
- [24] T. Worzyk, Submarine Power Cables - Design, Installation, Repair, Environmental Aspects, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [25] R. Donaghy, CIGRE, Ranska, Pariisi, 2018, s.110-116. Saatavissa <https://e-cigre.org/publication/CSE011-cse-011>

- [26] DNV GL Training course, Power Cables in General, kurssimateriaali, 2016.
- [27] G. Chen, M. Hao, Z. Xu, A. Vaughan, J. Cao, H. Wang, Review of High Voltage Direct Current Cables, CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015. Saatavissa <https://ieeexplore.ieee.org/>
- [28] A. Gustafsson, M. Saltzer, A. Farkas, H. Ghorbani, T. Quist, M. Jeroense, The new 525 kV extruded HVDC cable system, 2014. Saatavissa (viitattu 12.12.2018) <https://library.e.abb.com/public/7caadd110d270de5c1257d3b002ff3ee/The%20new%20525%20kV%20extruded%20HVDC%20cable%20system%20White%20PaperFINAL.pdf>
- [29] Fingrid Oyj, Fenno-Skan HVDC Link, Fenno-Skan 1 projektidokumentaatio. Rajoitettu saatavuus.
- [30] Nexans Norway AS, Estlink 2 projektidokumentaatio, Technical description 450 kV IRC cable. Rajoitettu saatavuus.
- [31] CIGRE Työryhmä B1.21, Third-Party Damage to Underground and Submarine Cables, CIGRE, 2009, Tekninen dokumentti 398. Saatavissa <https://e-cigre.org>
- [32] Elering, EstLink 2 information leaflet. Saatavissa (viitattu 13.3.2019) [http://estlink2.elering.ee/public/Dokumendid/EL2\\_teabeleht\\_A4\\_eng.pdf](http://estlink2.elering.ee/public/Dokumendid/EL2_teabeleht_A4_eng.pdf)
- [33] ABB Ab, Underground Cable Link: Supplying Europe's largest aluminium works, Norway. Verkkoaineisto. Saatavissa (viitattu 14.1.2019) <https://library.e.abb.com/public/5ca8947c0425d9acc1256e36004a1494/Project%20Sunndal%20132%20kV%20XLPE%20land-.pdf>
- [34] S. Iltanen, HVDC-kaapeliasiantuntija, Fingrid, Helsinki. Haastattelu, useita ajankohtia.
- [35] G. O'Reilly, J. Kearney, T. Looby, J. Lawler, Design of an Underwater Cable Fault Location Device to Precisely Locate Submarine Cable Faults, IEEE, 2017. Saatavissa <https://ieeexplore-ieee-org>
- [36] M. Bawart, M. Marzinotto, G. Mazzanti, Diagnosis and Location of Faults in Submarine Power Cables, IEEE, 2016. Saatavissa <https://ieeexplore-ieee-org>
- [37] Fingrid Oyj, Fingridin HVDC-yhteyksien kaapeliviat 1990-2018. Rajoitettu saatavuus.
- [38] C3TF1 työryhmä, Guide for Fault Locating Techniques on Shielded Power Cable Systems, IEEE, 2007. Saatavissa <https://ieeexplore-ieee-org>

- [39] R. Bascom, M. Herrmann, t. Zhao, Power Cable Failure Modes and Fault Location Methods, Practises and Strategies, IEEE PES T&D Conference and Exposition, 2014. Saatavissa <https://ieeexplore-ieee-org>
- [40] Sähkötyöturvallisuus SFS 6002:2015, Suomen Standardisoimisliitto, 2015.
- [41] CIGRE Työryhmä B1.40 , Offshore Generation Cable Connections, CIGRE, 2015, Tekninen dokumentti 610. Saatavissa <https://e-cigre.org>
- [42] T. Neier, Cable Fault Location in LV, MV and HV underground Cable Networks, BAUR, 2013. Saatavissa (viitattu 12.11.2018) [https://hvtechnologies.com/sites/default/files/inline-files/HVT\\_Product\\_brochure\\_Cable\\_Fault\\_Location.pdf](https://hvtechnologies.com/sites/default/files/inline-files/HVT_Product_brochure_Cable_Fault_Location.pdf)
- [43] J. Rygh, S. Nordrum, Aquadyne AS, Asker, Norja, 7.1.2019. Koulutusaihe: Kaapelin paikannus ja vianpaikannus magneettikentän mittaukseen perustuvalla menetelmällä ja Aquadyne-kaapelivianpaikannuslaitteella.
- [44] P. O'Rourke, E. Rochat, S. Hemphill, Innovative Fault Location and repair of Submarine Power Cables on the Seabed, CIGRE, Pariisi, Ranska, 2018. Saatavissa <https://e-cigre.org>
- [45] L. Brand, R. Silva, E. Bebbington, K. Chilukuri, Grid West Project HVDC Technology Review, Specialist Consultants to the Electricity Industry, 2014. Saatavissa (viitattu 11.1.2019) <http://www.eirgridgroup.com/site-files/library/EirGrid/Grid-West-HVDC-Technology-Review-Report-PSC.pdf>
- [46] J.E. Rygh, Toimitusjohtaja, Aquadyne AS. Sähköpostikeskustelu, Useita ajankohtia.
- [47] Fingrid, Diplomityön ohjausryhmän palaveri, Helsinki. Aihe: Vianpaikannuksen riskit ja riskienhallinta, 12.12.2018.
- [48] Basslink media statements, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 8.11.2018) <http://www.basslink.com.au/media/>
- [49] X. Bourgeat, Offshore Repair of the IFA 2000 Cross-Channel Link, Electra No 213, 2004. Saatavissa <https://e-cigre.org>
- [50] A. Naud, Localization of a failure on a submarine link, Jicable WETS'15 Workshop, Versailles, Ranska, 2015. Saatavissa (viitattu 14.12.2018) <http://www.jicable.org/Workshops/WETS15/sessions.html>
- [51] S. Jeong, Fault Location in Submarine Cables, Jicable WETS'15 Workshop, Versailles, Ranska, 2015. Saatavissa (viitattu: 31.10.2018) <http://www.jicable.org/Workshops/WETS15/sessions.html>
- [52] F. Petzold, D. Nowak, M. Muller, Cable Fault Location on long HVAC and HVDC Cable Systems, CIGRE, Portoroz, Slovenia, 2016. Saatavissa <https://e-cigre.org>

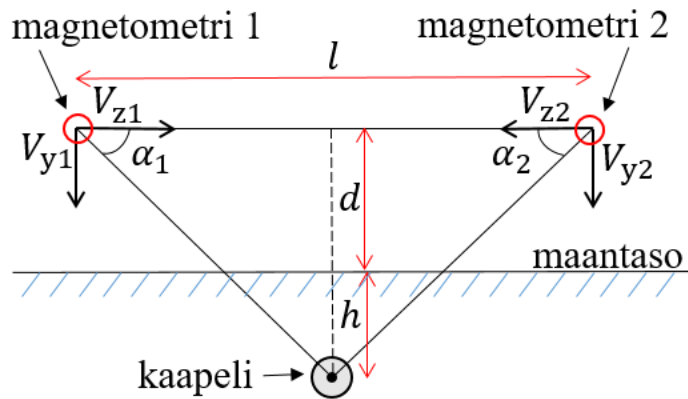
- [53] G. Kwon, C. Lee, G. Lee, Y. Lee, S. Changt, C. Jung, J. Kang, Y. Shin, Offline Fault Localization Technique on HVDC Submarine Cable via Time-Frequency Domain Reflectometry, IEEE, 2017. Saatavissa <https://ieeexplore-ieee-org>
- [54] H. Björklund, J. Ni, N. Nordtorp, Next generation of Line and Cable fault Locator for HVDC transmissions, CIGRE, Ranska, Pariisi 2018. Saatavissa <https://e-cigre.org>
- [55] Fingrid Oyj, Ruotsin ja Suomen välisen merikaapelin toimittaa Nexans, 2008, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.12.2018) <https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2008/ruotsin-ja-suomen-valisen-merikaapelin-toimittaa-nexans/>
- [56] sebaKMT, Pinpointing Acoustic method, Power-Point -esitys. Rajoitettu saatavuus.
- [57] Megger digiPHONE<sup>+</sup> NT käyttöohje, Surge Wave Receiver and Earth Fault Locator, 2012. Rajoitettu saatavuus.
- [58] T. Szyrowski, S. Sharma, R. Sutton, G. Kennedy, Developments in sub-sea and telecommunication cables detection: Part 2 - Electromagnetic detection, Underwater Technology, 2013. Saatavissa (viitattu 5.12.2018) [https://www.researchgate.net/publication/245032097\\_Developments\\_in\\_subsea\\_power\\_and\\_telecommunication\\_cables\\_detection\\_Part\\_2\\_-\\_Electromagnetic\\_detection](https://www.researchgate.net/publication/245032097_Developments_in_subsea_power_and_telecommunication_cables_detection_Part_2_-_Electromagnetic_detection)
- [59] CIGRE Työryhmä C4.204, Mitigation Techniques of Power-Frequency Magnetic Fields Originated from Electric Power Systems, CIGRE, 2009. Saatavissa <https://e-cigre.org>
- [60] M. Calasan, M. Ostojic, Magnetic field of the bipolar HVDC cable Montenegro-Italy in the sea and in the land section, CIGRE, 2017. Saatavissa (viitattu 15.12.2018) [https://www.researchgate.net/publication/318285121\\_Magnetic\\_field\\_of\\_the\\_bipolar\\_HVDC\\_cable\\_Montenegro-Italy\\_in\\_the\\_sea\\_and\\_in\\_the\\_land\\_section](https://www.researchgate.net/publication/318285121_Magnetic_field_of_the_bipolar_HVDC_cable_Montenegro-Italy_in_the_sea_and_in_the_land_section)
- [61] Innovatum Ltd, Magnetic Submarine Cable & Pipeline Survey Systems – Theory of Operation, Innovatum Ltd, 2012. Saatavissa (viitattu 14.3.2019) [http://innovatum.co.uk/media/1963/section\\_2\\_theory\\_of\\_operation-\\_issue\\_2.pdf](http://innovatum.co.uk/media/1963/section_2_theory_of_operation-_issue_2.pdf)
- [62] National Grid, How to Calculate the Magnetic Field from a two-core DC Cable, 2013. Verkkosivusto. Saatavissa (viitattu 21.1.2019) <http://www.emfs.info/>
- [63] L.Puranen, L. Korpinen, M. Hietanen, K. Jokela, L. Huurto, H. Päätikangas, T. Toivo, A. Sihvonon, H. Nuberg, Säteilylähteet ja Altistuminen, Säteilyturvallisuuskeskus, 2006. Saatavissa (viitattu 21.1.2019) [https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/6\\_9.pdf/d583d48c-c914-4593-a7bc-4d0e93415f85](https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/6_9.pdf/d583d48c-c914-4593-a7bc-4d0e93415f85)
- [64] M. Slater, R. Jones, A. Schultz, The prediction of electromagnetic fields generated by submarine power cables, Oregon Wave Energy Trust, 2010. Saatavissa (viitattu: 19.11.2018) <https://ir.library.oregonstate.edu/downloads/3t945r35r>

- [65] M. Jahromy, M Ostovarzadeh, R. Davarani, Detection of Underground Power Cable Route Using Magnetic Field, IEEE, 2017. Saatavissa <https://ieeexplore-ieee-org>
- [66] L. Korpinen, M. Hietanen, K. Jokela, J. Juutilainen, J. Valjus, Voimajohtojen sähkö- ja magneettikentät ympäristössä, Kauppa- ja Teollisuusministeriö, 1995.
- [67] E. Patronis, The Properties of Coaxial Cable Part 1 – The Magnetic Field, Synergetic Audio Concepts, 2009. Saatavissa (viitattu 11.3.2019) [https://www.prosoundtraining.com/site/wp-content/uploads/2010/01/VOL37\\_JAN09\\_Properties\\_Coaxial\\_Cable.pdf](https://www.prosoundtraining.com/site/wp-content/uploads/2010/01/VOL37_JAN09_Properties_Coaxial_Cable.pdf)
- [68] Fingrid Oyj, PI Vision -käytönvalvontajärjestelmä. Rajoitettu saatavuus.
- [69] D. Hrvoic, M. Pozza, High-Resolution Magnetic Target Survey, Marine Magnetics, 2004. Saatavissa (viitattu 20.11.2018) <http://www.marinemagnetics.com/custom/uploads/2015/10/high-res-magnetic-target-survey.pdf>
- [70] L. Puranen, Altistumisen mittaus ja laskentamallit, Säteilyturvallisuuskeskus, 2006. Saatavissa (viitattu 16.1.2019) [https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/6\\_10.pdf/588055cc-7672-446a-a12a-570df87b3599](https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/6_10.pdf/588055cc-7672-446a-a12a-570df87b3599)
- [71] Aquadyne käyttöohje, Aquadyne AS / Megger AS Subsea HV Cable Locator System for Fingrid Oyj, 2019. Rajoitettu saatavuus.
- [72] TSS (International) Ltd, 350 Cable Survey System – System Manual, 2008. Saatavissa (viitattu 31.1.2019) [http://www.oceanscan.net/gallery/PDFs/350\\_System\\_Manual\\_v2.4.pdf](http://www.oceanscan.net/gallery/PDFs/350_System_Manual_v2.4.pdf)
- [73] C.E. Hillesund, J. Waite, J.E. Rygh, Submarine Cable Location - New Technology and testing, CIGRE, Pariisi, Ranska, 2016. Saatavissa <https://e-cigre.org>
- [74] P. Menconi, D. Liparoto, Tracking and Fault Location in Undersea Cables, IEEE, 1992. Saatavissa <https://ieeexplore-ieee-org>
- [75] T. Tricas, A. Gill, Effects of EMFs from Undersea Power Cables On Elasmobranchs and Other Marine Species, U.S. Department of the Interior, 2011, s.34-36. Saatavissa <https://www.boem.gov/Environmental-Stewardship/Environmental-Studies/Pacific-Region/Studies/2011-09-EMF-Effects.aspx>
- [76] F. Lesur, F. Deschamps, Electromagnetic fields of DC cable systems, CIGRE, 2012. Saatavissa <https://e-cigre.org>
- [77] J. Lenz, A. Edelstein, Magnetic Sensors and Their Applications, IEEE, 2006. Saatavissa <https://ieeexplore-ieee-org>
- [78] P. Ripka, Advances in Fluxgate Sensors, Elsevier, 2003. Saatavissa <https://www.sciencedirect-com>

- [79] A. Matsuoka, M. Shinohara, Y. Tanaka, A. Fujimoto, K. Iguchi, Development of fluxgate magnetometers and applications to the space science missions, TERRAPUB, 2013. Saatavissa (viitattu 10.1.2019) [https://www.terrapub.co.jp/onlineproceedings/ste/aisi/pdf/aisi\\_217.pdf](https://www.terrapub.co.jp/onlineproceedings/ste/aisi/pdf/aisi_217.pdf)
- [80] Innovatum Ltd, Manual Section 7 - Tone Generators, 2012, vol. 2. Saatavissa (viitattu 26.2.2019) [http://www.innovatum.co.uk/media/1963/section\\_2\\_theory\\_of\\_operation-\\_issue\\_2.pdf](http://www.innovatum.co.uk/media/1963/section_2_theory_of_operation-_issue_2.pdf)
- [81] R. Capocci et al, Inspection-Class Remotely Operated Vehicles—A Review, Journal of Marine Science and Engineering , 2017. Saatavissa (viitattu 28.1.2019) <https://www.proquest.com/>
- [82] H. Tillin et al, Remotely Operated Vehicles for use in marine benthic monitoring, J NCC, 2018. Saatavissa (viitattu 28.1.2019) [https://www.researchgate.net/publication/326462184\\_Remotely\\_Operated\\_Vehicles\\_for\\_use\\_in\\_marine\\_benthic\\_monitoring](https://www.researchgate.net/publication/326462184_Remotely_Operated_Vehicles_for_use_in_marine_benthic_monitoring)
- [83] R. Christ, R. Wernli, The ROV Manual – A User Guide for Remotely Operated Vehicles, Elsevier, 2014. Saatavissa (viitattu 12.3.2019) <https://www.sciencedirect.com/>
- [84] Sperre AS, Sub-Fighter 10K. Verkkosivu. Saatavuus (viitattu 28.1.2019) <https://sperre-as.com/portfolio/sub-fighter-10k/>

## LIITE A: HAUTAUSSYVYYDEN MÄÄRITTÄMINEN KOLMIOMITTAUKSEN AVULLA

Kuvassa A.1 on esitetty hautaus­syvyyden mää­ri­tyk­sessä käytetty asetelma, jossa magne­to­metrin x-suuntainen komponentti on oletettu kaapelin suuntaiseksi, y-suuntainen kom­po­nentti on kaapelin nähden pystysuunnassa ja z-komponentti on kaapeliin nähden vaa­ka­tasossa.



**Kuva A.1.** Hautaus­syvyyden mittauksessa käytetty periaatekuva, josta näkyvät magne­to­metriin indusoituneet jännitteet  $V_y$  ja  $V_z$ , magne­to­metrin ja kaapelin väli­set kulmat  $\alpha$  maantasoon nähden, mit­tau­spisteiden välinen etäisyys  $l$ , magne­to­metrin etäisyys maan­pin­nasta  $d$  ja kaapelin hau­tau­syvyys  $h$ . Magne­to­metri x-suuntainen kom­po­nentti on oletettu kaapelin suuntaiseksi. Muokattu lähteestä [72].

Magne­to­metrin ja kaapelin väli­set kulmat  $\alpha$  voidaan laskea kaavoista (A1a) ja (A1b) magne­to­metrin y- ja z-suuntaisiin käämeihin indusoituneiden jännitteiden tangentista

$$\alpha_1 = \tan^{-1}\left(\frac{V_{y1}}{V_{z1}}\right) \quad (\text{A1a})$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1}\left(\frac{V_{y2}}{V_{z2}}\right) \quad (\text{A1b})$$

Mittaus­pisteiden välinen etäisyys voidaan laskea kaavasta (A2)

$$l = (d + h)\left(\frac{1}{\tan\alpha_1} + \frac{1}{\tan\alpha_2}\right) \quad (\text{A2})$$

Kaavojen (A3a) ja (A3b) avulla voidaan muokata kaavaa (A2) ja ratkaista siitä hau­tau­syvyys  $h$

$$\tan\alpha = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} \quad (\text{A3a})$$

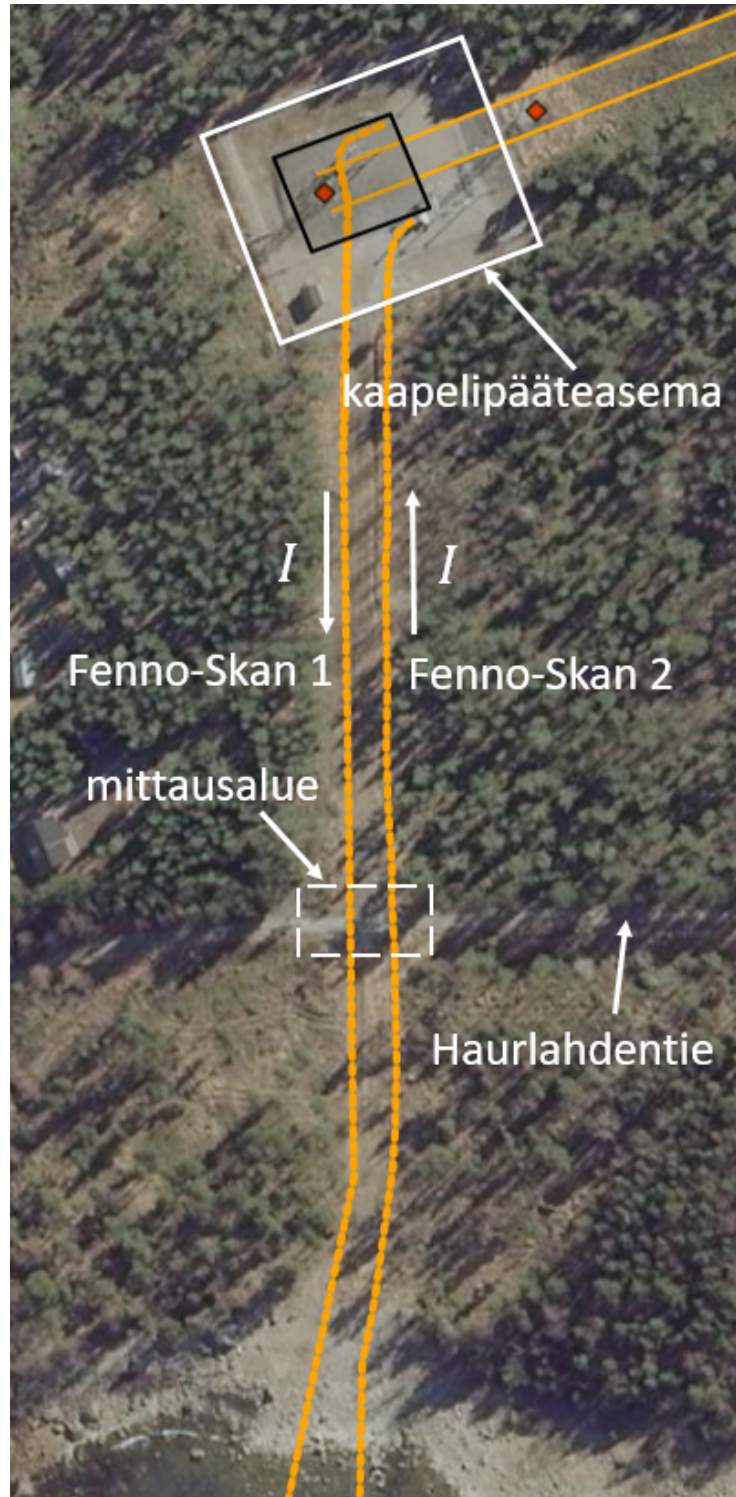
$$\sin(\alpha_1 + \alpha_2) = \cos\alpha_1 \sin\alpha_2 + \cos\alpha_2 \sin\alpha_1 \quad (\text{A3b})$$

Tällöin hautaussyvyys saadaan kaavasta (A4)

$$h = l \left( \frac{\sin\alpha_1 \sin\alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \right) - d \quad (\text{A4})$$



## LIITE B: KAAPELEIDEN PAIKANTAMINEN RIHTNIEMESSÄ



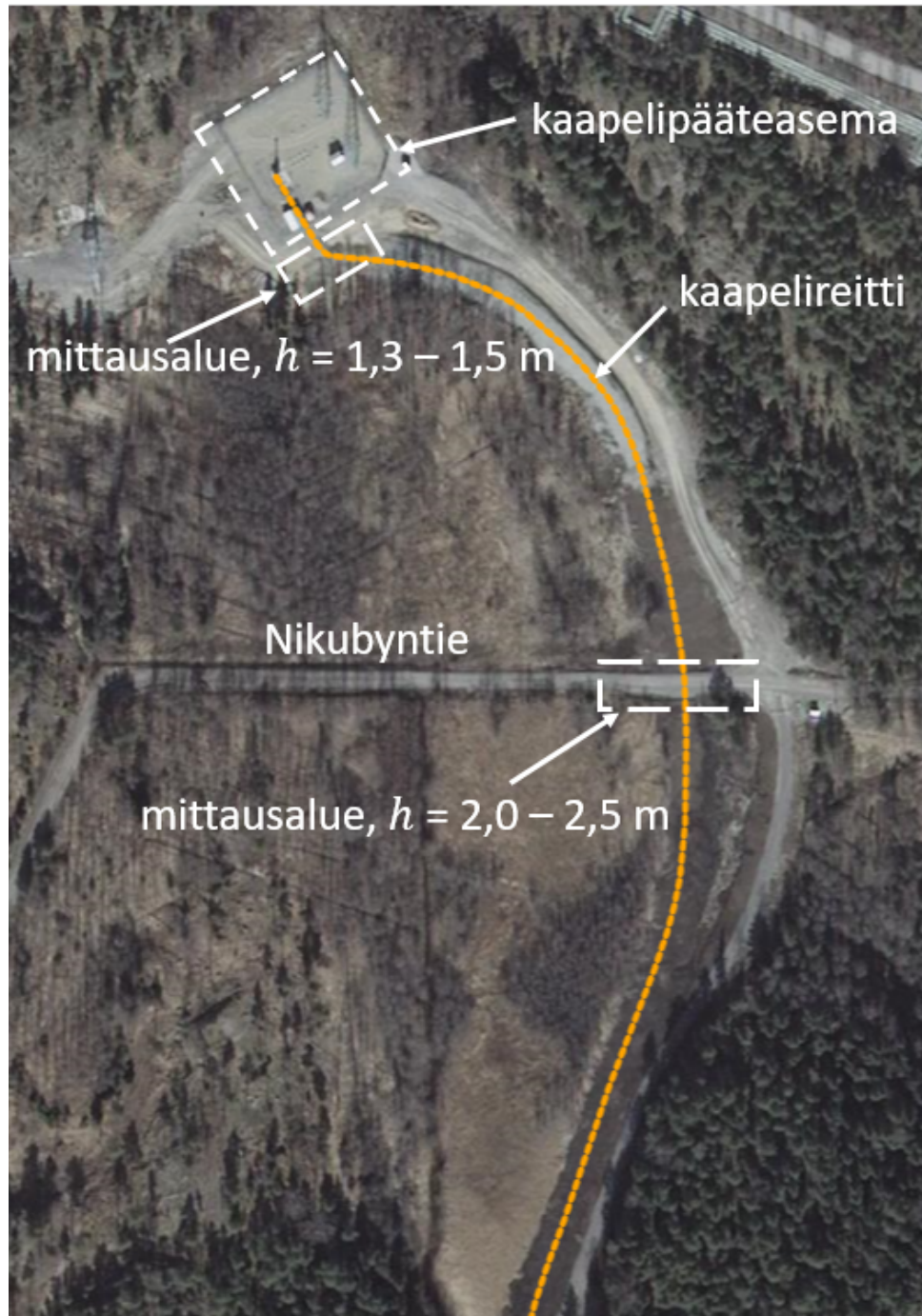
**Kuva B.1.** Kaapeleiden mittausalue Rihtniemessä, muokattu lähteestä [13].

## LIITE C: KAAPELEIDEN PAIKANTAMINEN ESPOOSSA



**Kuva C.1.** Kaapeleiden mittausalue Espoossa, muokattu lähteestä [13].

## LIITE D: KAAPELIN PAIKANTAMINEN NIKUVIKENISSÄ



**Kuva D.1.** Kaapeleiden mittausalueet Nikuvikeniissä, muokattu lähteestä [13].