



110 KV KAAPELEIDEN ASENNUSTRATKAISUT KATURAKENTEES

Iira Hämäläinen

Opinnäytetyö

Toukokuu 2013

Sähkötekniikka

Sähkövoimatekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

HÄMÄLÄINEN, IIRA:

110 kV kaapeleiden asennusratkaisut katurakenteessa

Opinnäytetyö 50 sivua, joista liitteitä 1 sivua
Toukokuu 2013

Helen Sähköverkko Oy:llä (HSV) on menossa kattava 110 kV kaapeleiden investointiohjelma, jossa uusitaan teknisen elinkaarensa päässä olevat, 1960- ja 70-luvuilla asennetut kaapelit. Lisäksi lähivuosina rakennetaan paljon uutta jakelukapasiteettia. Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli auttaa tulevien projektien suunnittelussa, kerätä kaapelointiprojektien yksikköhintoja sekä selvittää uusia kaapeleiden mekaanisen suojauksen ratkaisuvaihtoehtoja.

Opinnäytetyössä tutkittiin kaapeleiden asennusratkaisuja keskusta- ja esikaupunkialueella. Lisäksi tarkasteltiin eri asennusvaihtoehtojen vikaantumisriskejä ja uhkia. Työssä laskettiin teoreettinen vikataajuus, kun kaapelilla ei ole minkäänlaista mekaanista suojaa keskijänniteverkon vikatilastojen avulla. Tutkimuksen kohteena olivat myös asennusratkaisuista määräytyvät kaapeleiden suurimmat kuormitettavuudet ja magneettikentät.

HSV on myös kiinnostunut käyttämään kaapeleiden yhteydessä niiden lämpötilanvalvontaa, joka mittaisi kaapelia joko jatkuvasti tai hotspot-alueita. Tässä opinnäytetyössä selvitettiin teoriapohjaisesti ratkaisua kaapelin lämpötilanmittausjärjestelmäksi.

ABSTRACT

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

HÄMÄLÄINEN, IIRA:
Installation Solutions for 110 kV Cables in Street Structures

Bachelor's thesis 50 pages, appendices 1 pages
May 2013

Helen Electricity Network Ltd has a major on-going investment programme for 110 kV cables where old cables installed in the 1960's and 1970's are renewed because they have reached the end of their life cycle. In the near future, additional distribution capacity will also be built. The purpose of this thesis is to assist in the planning of the coming projects, to gather unit prices for cabling projects in the excavation work, and to find new solutions for the mechanical protection of cables.

The thesis examines different cable installation solutions in city and suburban areas. In addition, each installation method was studied in respect of their risks and threats, and the fault frequency of cables without any mechanical protection was studied on the basis of statistics of faults in the medium-voltage network. The maximum capacity and the magnetic fields of cables, typical for the installation method used, were also studied.

Helen Electricity Network Ltd is also interested in using temperature monitoring that would measure cables either continuously or at hotspot areas. This thesis studies theoretical solutions for cable temperature measurement systems.

Key words: cables, installation solutions, fault frequency, unit prices

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	7
1.1 Helen Sähköverkko Oy	7
1.2 110 kV kaapelit	8
2 KAAPELEIDEN MEKAANISET SUOJAUSTAVAT	10
2.1 Betonielementit	10
2.2 Betonikansi	12
2.3 Anturamuotti	13
2.4 Suojaamaton	14
2.5 Muita mahdollisia mekaanisia suojausratkaisuja	15
3 KAAPELEIDEN KUORMITETTAVUUS	17
3.1 Asennus kolmioon	17
3.2 Asennus tasoon	17
3.3 Vierusmateriaalit	18
3.4 Kaapelin kosketussuojan maadoitustavat	20
3.4.1 Maadoitus molemmista päistä (Solid bonding)	20
3.4.2 Maadoitus vain toisesta päästä (Single bonding)	21
3.4.3 Cross-bonding	22
3.4.4 Esimerkkitapaus	24
3.5 Kaapeleiden lämpötilanvalvonta	26
3.5.1 Optinen kuitu	27
3.5.2 Prosessiyksikkö	28
3.5.3 Asennus ja signaalitieto	29
4 MAGNEETTIKENTÄT	31
4.1 Teoreettinen tarkastelu	31
4.2 Teoreettisia laskelmia	33
4.2.1 Tasoasennus	33

4.2.2 Kolmioasennus	34
4.3 Magneettikenttämittaus	36
5 VIKATAAJUUS ILMAN MEKAANISTA SUOJAUSTA	38
5.1 Kaapeliasennusten riskit ja uhat	38
5.2 Vikataajuus.....	39
6 MAANRAKENNUSTÖIDEN JA SUOJAUSTAPOJEN YKSIKKÖHINNAT	42
6.1 HSV:n projektien maanrakennustöiden yksikköhintoja.....	42
6.2 Energiamarkkinaviraston yksikköhinnat.....	44
7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	46
LÄHTEET.....	48
LIITTEET	50
Liite 1. Kaapelin asennusratkaisun vaikutus kuormitettavuuteen ja häviöihin.....	50

LYHENTEET JA TERMIT

<i>B</i>	magneettivuon tiheys, T
CTM	kaapelin lämpövalvonta, <i>cables thermal monitoring</i>
DTM	hajautettu lämpötilanvalvonta, <i>distributed temperature monitoring</i>
EMV	Energiamarkkinavirasto
<i>H</i>	magneettikentän tiheys, A/m
Helen	Helsingin Energia
HSV	Helen Sähköverkko Oy
kj	keskijännite
kV	kilovoltti
PVC	polyvinyylidikloridi
sj	suurjännite
STM	Sosiaali- ja terveysministeriö
SVL	vaippajännitteen rajoitin, <i>shealt voltage limiter</i>
λ_l	lämmönjohtavuus, W/K·m
λ_v	vikataajuus

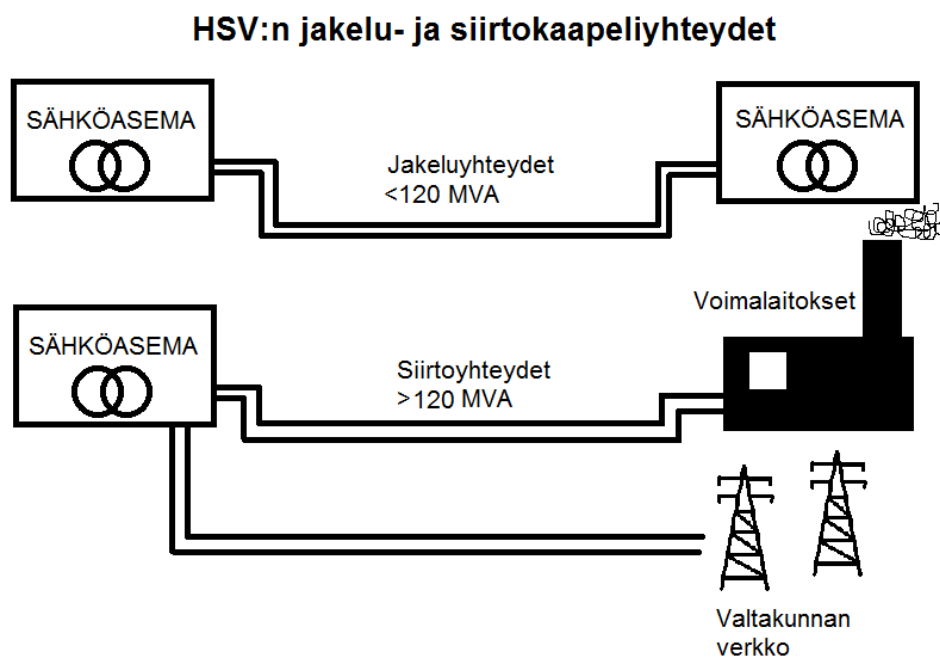
1 JOHDANTO

1.1 Helen Sähköverkko Oy

Helen Sähköverkko Oy (HSV) vastaa lähes koko Helsingin kaupungin alueen sähkön jakelusta ja siirrosta, ja on osa Helsingin kaupungin omistamaa Helen –konsernia. HSV:n jakelualueella sähköverkkoa on noin 6300 kilometriä, joista pienjänniteverkkoa 4500 kilometriä ja keskijänniteverkkoa 1600 kilometriä. Sähköasemia jakelualueella on 22 kappaletta ja liittymien kokonaismäärä vuoden 2012 lopussa oli 31 891 kappaletta. (Helen 2012)

HSV:llä on käynnissä mittava 110 kV kaapeleiden investointiohjelma (2012 - 2015), jonka tavoitteena on lisätä siirtoverkon kapasiteettia ja uusia teknisen elinkaarensa päässä olevat kaapeliyhteydet. Tällä pyritään entistä luotettavampaan sähkönjakeluun kehittyvällä ja uusiutuvalla pääkaupunkialueella. Kaapeleiden mekaanisten suojausrakenteiden valinnalla priorisoidaan kustannuksia ja elinkaaren aikaista riskitasoa. HSV:llä 110 kV:n kaapeliverkkoa on nykyisin noin 60 kilometriä. Vuosina 2012 - 2015 rakennetaan noin 36 km 110 kV kaapeliyhteyttä, joista hieman alle puolet muodostuu nykyisten kaapeliyhteyksien uusimisella sekä yli puolet uuden kapasiteetin rakentamisesta.

Kuvassa 1 on esitetty 110 kV:n jakelu- ja siirtokaapelit sekä niiden tehonsiirtokyky HSV:n verkossa.



KUVA 1. Kaapeliyhteydet ja tehonsiirtokyky HSV:n verkossa

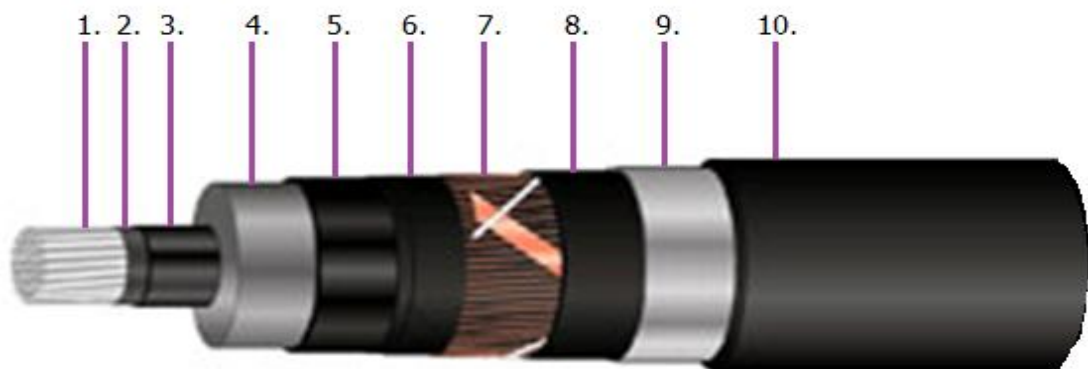
Osa Helsingin kaupungin alueella sijaitsevista 110 kV:n kaapeleista sijaitsee energia-tunneleissa, joita tämä opinnäytetyö ei käsittele.

Opinnäytetyön aineistona käytettiin HSV:n vuosina 2008 - 2012 toteutuneita 110 kV kaapeliprojekteja, joista kaksi sijaitsee esikaupunkialueella ja loput neljä kantakaupungissa.

1.2 110 kV kaapelit

Suurjännitekaapeleihin lukeutuvalla 110 kV kaapelilla tarkoitetaan sähköenergian siirtotarkoituksia varten käytettyä tai valmistettua saman mekaanista vahingoittumista, kosteutta ja korroosiota estävän vaipan sisällä olevaa yhden tai useamman eristetyn johtimen muodostamaa johdinryhmää eristyksineen ja suojauksineen, jonka rakenne on esitetty kuvassa KUVA 2. Kaapelin tehtävä on siirtää tarvittava sähköteho ja -energia haluttuun paikkaan mahdollisimman taloudellisesti, teknisesti hyväksyttävästi ja ympäristöä mahdollisimman vähän häiriten.

Maakaapelin tulee kestää suuria tehoja ja rasituksia, joten sen on oltava hyvin eristetty. Suuri virta tarkoittaa suurta johdinpoikkipintaa ja suuri jännite riittävän paksua eristettä. Kaapelit voidaan jakaa rakenteensa suhteen yksijohdinkaapeleihin, kolmijohdinkaapeleihin ja kerrattuihin kolmijohdinkaapeleihin.



KUVA 2. Suurjännitekaapelin rakenne: 1. Johdin, 2. Johdinsuojanauhoitus, 3. Johdinsuoja, 4. Eristys, 5. Hohtosuoja, 6. Kosketussuojanauhoitus, 7. Kosketussuoja, 8. Kosketussuojanauhoitus, 9. Alumiinilaminaatti, 10. Ulkovaippa. Lähde (Prysmian 2012) mukailten.

Johdin valmistetaan yleensä alumiinista tai kuparista. Näistä alumiini on kevyempää ja edullisempää. Kuparin sähkönjohtavuus on kuitenkin parempi kuin alumiinilla, joka

mahdollistaa kuparijohtimen pienemmän koon ja näin suuremman kuormitettavuuden verrattuna johdinpoikkipintaan. Taulukossa 1 on esitetty kuparin ja alumiinin sähköisiä ominaisuuksia.

TAULUKKO 1. Kuparin ja alumiinin sähköisiä ominaisuuksia. (Laasonen 2011, 373)

	Kupari	Alumiini
Sähkönjohtavuus [$1/(\Omega\text{m})$]	$59,526 \cdot 10^6$	$37,7 \cdot 10^6$
Lämpötilakerroin [$1/K$]	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Tiheys [kg/dm^3]	8,96	2,7

Pääasiassa kuormitettavuus määrää 110 kV kaapelin poikkipinta-alan, joka on HSV:n verkossa jakelukaapeleilla yleensä $300 - 800 \text{ mm}^2$ ja 110 kV siirtokaapeleilla $1000 - 2000 \text{ mm}^2$. Suomessa johtavia suurjännitekaapeleiden valmistajia ovat Prysmian Finland Oy ja Reka Kaapeli Oy. Suurjännitekaapeleilta odotetaan vähintään 50 – 60 vuoden teknistä elinikää.

Maakaapelia voidaan käyttää yhteisiä infrareittejä hyödyntäen, mikä lasketaan kaapeleiden eduksi. Tällaisia ovat tietoliikenneyhteydet, vesi- ja jätevesiputket, kaukolämpöputket sekä katuvalokaapelit. Kaapeleiden kulkiessa kaukolämpöputkien vieressä on kuitenkin huomioitava, että kaukolämpöputket pienentävät tällöin kaapeleiden kuormitettavuutta johtuen kaukolämpöputkien lämpöhäviöistä. Lisäksi vaurioituessaan kaukolämpöputket ja vesijohdot muodostavat riskin kaapelin vaurioitumiselle. Kaapelit ovat asennettava vähintään routarajan alapuolelle eli Suomessa yleensä syvemmälle kuin 0,6 metriin (Laasonen 2011, 384). Suurjännitekaapeleiden ohjeellinen asennussyvyys HSV:llä on 1,3 metriä ja kj-kaapeleilla 0,7 metriä. Kaapelit pyritään asentamaan näiden ohjeiden mukaan, mutta käytännössä se on mahdotonta toteuttaa koko kaapelireitin pituudelta. Kaapelin asennussyvyys vaihtelee pinnanmuotojen sekä muiden ristelevien maanalaisten johtojen ja putkien takia. Ongelmana on myös se, että esimerkiksi kaukolämpöputkien asennussyvyys on usein sama kuin 110 kV kaapeleilla. Viime aikoina HSV on pyrkinyt sijoittamaan 110 kV kaapelit vilkkaiden ajoratojen alituksessa 1,6 metrin syvyyteen.

Maakaapelilla on monia hyviä puolia verrattuna avojohtoihin. Kaapeli on suojassa maan alla tuulelta ja lumelta, eivätkä salamaniskut osu kaapeliin yhtä usein kuin avojohtoihin. Maankäytölliset syyt estävät myös avojohtojen käyttämisen ydinkeskusta-alueella. Kaapeli ei ole kosketeltavissa, jolloin vahinkojen sattuminen ja ilkivalta ovat vähäisempiä. Toisaalta kaapeleiden investointikustannukset ovat avojohtoihin verrattuna huomattavasti suuremmat.

2 KAAPELEIDEN MEKAANISET SUOJAUSTAVAT

HSV on käyttänyt useampia asennusratkaisuyhdistelmiä kaapeli-asennuksissa Helsingin alueella. Asennustapa voi vaihtua kesken kaapelireitin toiseksi esimerkiksi risteysalueella tai tultaessa maastosta tieosuudelle, riippuen siitä, kuinka suuri on kaapelin vaurioitumisriski kyseisellä osuudella. Esimerkiksi HSV:n reitillä 3¹ on käytetty suojaustapana betonielementtiä sekä -kantta, koska reitti kulkee ajoradan läheisyydessä, missä on tulevaisuudessa luvassa rakennustöitä. Mekaanisen suojaustavan määrittämisen lähtökohtana voi siis tilanteesta riippuen olla myös verkon käyttövarmuus tai tulevat maanrakennustyöt. Mekaaninen suojaustapa vaikuttaa myöhemmin käsiteltäviin 110 kV verkon vikataajuuksiin. Tässä luvussa on esitelty HSV:n käyttämiä suojausratkaisuja sekä mahdollisia uusia suojausmenetelmiä.

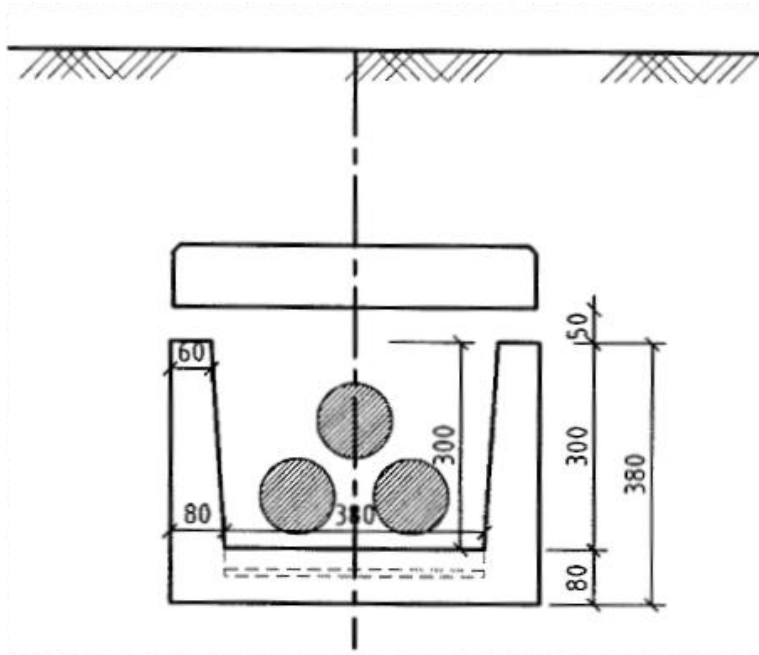
2.1 Betonielementit

Yleisin mekaaninen suojaustapa on valmiit betonielementit, joiden päälle asennetaan betonikannet. Tämä suojausmenetelmä on lähtökohtaisesti kaikkein varmin tapa, sillä kaapelit ovat suojattuna kovalla rakenteella jokaisesta suunnasta. HSV käyttää 110 kV kaapeleiden suojaamiseen betonielementtejä perinteisesti keskusta-alueella, missä tapahtuu eniten ulkopuolista työskentelyä kaapeleiden läheisyydessä. Kaapelien suojaamisella betonielementeillä on tarkoitus parantaa verkon käyttövarmuutta.

Kaapelielementti on perinteisesti kooltaan 3000x300x540 mm (pituus, korkeus, leveys) betonivalu (kuva 3 ja kuva 4). Betonielementin massa on noin 530 kg. Elementti pysyy kiinni rosterilattojen avulla, jotka hitsataan kiinni seuraavan elementin raudoituksissa oleviin rosterilattoihin. Betonielementti sisältää raudoituksen. Betonielementtiin asennetaan suojaputket, joihin kaapelit myöhemmin vedetään. Betonielementti täytetään lopuksi hiekalla, betonilla tai weak-mixillä, joita käsitellään tarkemmin luvussa 3.3, jossa käsitellään vierusmateriaalin vaikutusta kuormitettavuuteen.

Elementti täytetään hiekalla niin, että hiekka ylittää elementin reunan 100 mm:llä. Kun hiekka painuu ja tiivistyy, saadaan tällä tavalla täytettyä elementti kunnolla.

¹ Kaapelireitit on numeroitu numeroin 1-5. Reittien sijainnit ovat salattua tietoa.



KUVA 3. Periaatekuva, elementti ja kansi (Virpiö 2004)



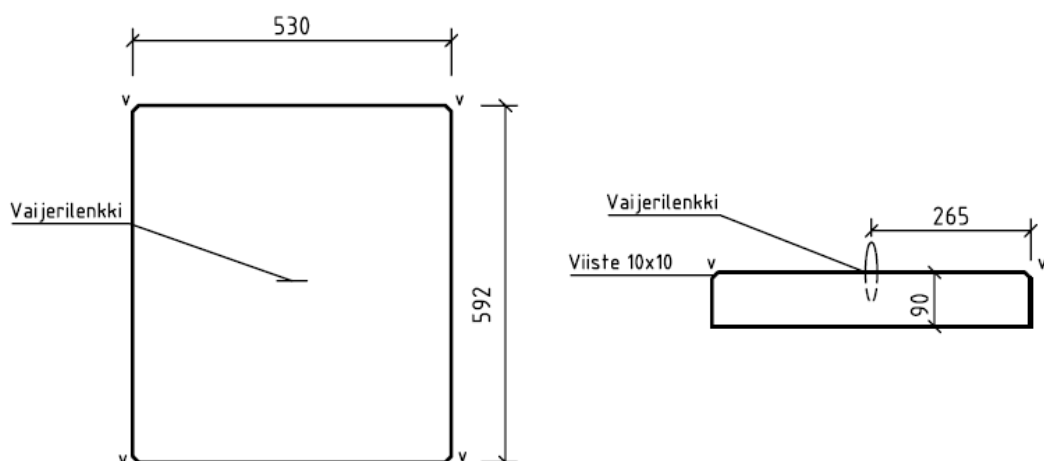
KUVA 4. Valokuva elementeistä varastoituna (HSV)

Suojaputkien halkaisijalla voidaan vaikuttaa kaapelin vioittumisriskiin. Mitä suurempi suojaputken halkaisija on sitä enemmän se voi painua sisäänpäin ja näin kaapelin vioittumisriski pienenee. 1970–1980 –luvuilla on käytetty alumiiniselle 800 mm^2 kaapelille 110 mm suojaputkea, jonka jälkeen on siirrytty käyttämään pääosin halkaisijaltaan 140 mm putkea. HSV on käyttänyt myös joissain projekteissa 160 mm putkea. Suurilla kaapeleiden poikkipinnoilla ($1600\text{--}2000 \text{ mm}^2$) suojaputken halkaisija voi olla jopa 200 mm.

Suojaputket on valmistettu polyeteenistä, joka on kestävää alhaisissakin lämpötiloissa, kevytrakenteinen ja joustava käsitellä. Lisäksi polyeteeni on kuormitettavuuden kannalta parempi vaihtoehto kuin PVC. Suojaputket on jaoteltu rengasjäykkyyden ja iskulujuuden perusteella kahteen lujuusluokkaan. A-luokan putket ovat niin sanottuja raskaankäytön suojaputkia (rengasjäykkyys $SN \geq 16 \text{ kN/m}^2$) ja B-luokan putket taas keskiraskaan käytön suojaputkia (rengasjäykkyys $SN \geq 8 \text{ kN/m}^2$). B-luokan putket ovat näin kevyempiä, eikä niitä käytetä esimerkiksi raskaan liikenteen alueilla. A-luokan putki on noin 40-49 % kalliimpi verrattuna B-luokan suojaputkeen. Suojaputken värinä käytetään keltaista (kuva 7), mutta vanhemmissa asennuksissa on käytetty myös mustaa väriä. Jos kaapelireitillä käytetään mekaanisena suojarakenteena betonielementtiä, riittää sen sisälle suojaputken lujuudeksi B-luokka, koska elementti itsessään antaa kokonaisuudelle riittävän mekaanisen suojauksen. Kaapelin suojaputkien vaatimukset on esitetty standardissa SFS 5608. (Uponor 2013)

2.2 Betonikansi

Kaapeleita ei aina tarvitse laittaa massiiviseen betonielementtiin, vaan sille riittää suojukseksi pelkkä betonista tehty kansirakenne (kuva 5). Kaapelit asennetaan tällöin maahan suojaputkissa ja peitetään hiekalla, jonka päälle kansi asetetaan. Tällöin on suositeltavaa käyttää suurempaa suojaputken kokoa ja A-luokan suojaputken vahvuutta, koska kaapeli on suojattu vain yläpuolelta tulevilta iskuilta.



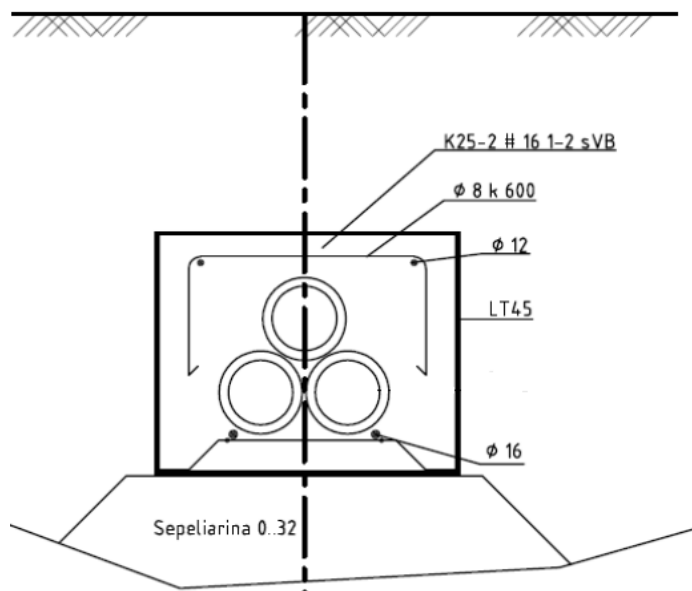
KUVA 5. Kansielementin mitat (Virpiö 2004)

Betonielementin kansi on noin 500x600 mm kokoinen laatta. Yhden kannen massa on noin 78 kg ja kansi pitää sisällään raudoituksen.

2.3 Anturamuotti

Betonielementit voi korvata myös anturamuoteilla, joita HSV kokeili pilottihankkeena esikaupunkialueella olevalle kaapeliyhteydelle (kohde 5). Anturamuotit on helpompi asentaa ja on hitaiden betonielementtien siirtelyä nopeampaa. Lisäksi niiden välivarastointi työmaalla vie vähemmän tilaa. Anturamuotit ovat myös kustannustehokkaita (taulukko 2) ja takaavat silti vastaavanlaisen suojan kuin betonielementit. (Parviainen 2009) Anturamuotin käytöstä ei kuitenkaan ole vielä riittävästi kokemusta ja sen käyttöön liittyy riskejä, eikä sitä siten erityisemmin suositella käytettäväksi pääasiallisena suojausratkaisuna.

Itse anturamuotti on oletuksena 500x400x5000 mm, jossa on raudoitukset reunoilla ja pohjalla (kuva 6). Muottiin asennetaan kolmioon kolme putkea, ja muotti valetaan betonilla. Anturamuotit asennetaan samaan syvyyteen kuin betonielementit ja soramurskeen alle laitetaan koko kaivannon pituudelta suodatinkangasta. Ulkoreuna tulee olla merkittävästi suurjännitekaapeliksi.



KUVA 6. Anturamuotti (Parviainen 2009)

Kuvassa 7 on toteutettu ratkaisu, jossa betonielementistä siirrytään vihreään anturamuottiin asennusolosuhteista johtuen. Kaapelireitti ylittää toisen yhteyden, jolloin hel-

poin ratkaisu on käyttää jäykän betonielementin sijasta joustavampaa anturamuottia. Myös asennustapaa on jouduttu muuttamaan kolmiosta tasoasennukseen.



KUVA 7. Työmaakuva anturamuotin asennuksesta (HSV)

2.4 Suojaamaton

Alueilla, joissa maanrakennustyöt eivät ole suuri uhka kaapeleille, voidaan mekaaninen suojaus jättää kokonaan pois. Tällaisia paikkoja ovat esimerkiksi taajamissa harvaan asutuilla alueilla, joissa uudisrakentaminen on vähäistä.

Kaapelit asennetaan putkissa kaapelikaivantoon ja peitetään hiekalla tai soralla. Kaapelin ainoa suoja on polyeteenistä valmistettu suojaputki, jonka koko kannattaa valita tällaisessa tapauksessa harkinnan mukaan tarpeeksi isoksi. Mekaanisen suojauksen jäädessä pois, ei tule lainkaan mekaanisen suojausratkaisun materiaali- ja sen asennuskustannuksia ja kaapelireitin kokonaishinta on tällöin edullisempi.

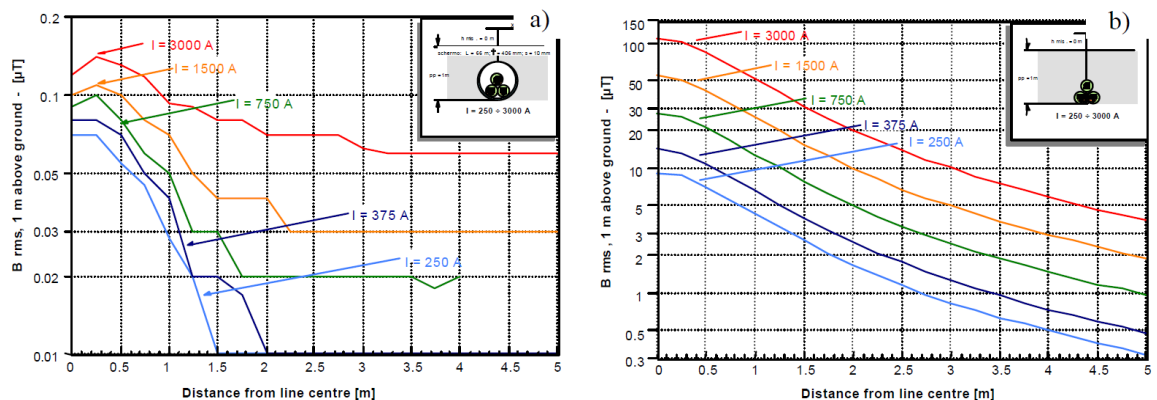
HSV:llä on käytetty tätä ratkaisua kahdessa kohteessa, jossa kyseessä ovat 110 kV muuntajakaapelit. 110 kV kaapeleiden päällä sijaitsevat keski- ja pienjännitejohdot, jolloin mahdollinen kaivuaurio kohdistuu ensiksi niihin.

2.5 Muita mahdollisia mekaanisia suojausratkaisuja

Joskus ympäristöolosuhteet ja esimerkiksi Liikennevirasto vaativat tapauskohtaisesti erilaisen suojaustavan edellä mainittujen sijasta. Tällaisia ovat muun muassa suurien teiden alitukset, joissa on suuri mekaaninen kuormitus.

Edelliset suojaustavat voidaan korvata esimerkiksi käyttämällä eri materiaaleista valmistettuja suojaputkia, jonne kaapelit laitetaan muoviputkissa (kuva 9). Tätä suojaustapaa on käytetty esimerkiksi Italiassa. Käytettyjä materiaaleja ovat esimerkiksi teräs ja ruostumaton teräs eli rosteri, joka on ferromagneettinen aine, sekä alumiini. Alumiiniin ei indusoidu virtoja magneettikentistä, mutta maaperä aiheuttaa sen syöymistä ajan kuluessa.

Teräksestä valmistettu mekaaninen suojausputki vaimentaa hyvin kaapeleiden aiheuttamia magneettikenttiä (kuva 8), joka mahdollistaa kaapeleiden asentamisen lähemmäksi maanpintaa. Teräsputki on tunnettu sen kestävyydestä, joten se mahdollistaa kaapeleiden hyvän mekaanisen suojauksen. Teräkseen indusoituu kuitenkin kaapelista suuria virtoja, minkä takia olisi suositeltavampaa käyttää ruostumattomasta teräksestä tehtyä metalliputkea. Itse ruostumaton teräsputki parantaa kuormitettavuutta, toisin kuin teräsputki pudottaa sitä roimasti.



KUVA 8. Erään 132 kV maakaapelin magneettikenttämittausten tulokset a) kun suojana on teräsputki, b) ilman suojausta (Conti 2003)

Metalliputkien asennus vaatii saman verran resursseja kuin betonielementtien asennus. Kaapelit asennetaan kolmioon metalliputken pohjalle. Teoriassa kaapelit voisi asentaa metalliputken reunoille mahdollisimman kauaksi toisistaan magneettikenttien heikentämiseksi, jos metalliputken halkaisija on niin suuri, että se on kannattavaa. Tämä on

käytännössä todella hankalaa, koska kaapelit tarvitsisivat jonkinlaisen pidikkeen metalliputken kylkiin. Asennus olisi tällaisessa tilanteessa monimutkaisempaa.



KUVA 9. Kaapelit metalliputkessa

Metalliputken koolla on noin 1,0 % vaikutus kuormitettavuuteen. Kuormitettavuutta saadaan parannettua, jos metalliputki täytetään betoniitilla tai betonilla. Tällöin asennuskustannukset ovat huomattavasti korkeammat, mutta kuormitettavuus stabiilimpaa. Asennuksen kannalta suojaputken halkaisijan tulisi olla kuormituksen takia noin 1,5 -kertainen verrattuna kaapelin halkaisijaan. (Törrönen, 2013)

Metalliputken halkaisija riippuu kaapelireitin tehosta. Mitä suurempi on kaapelin poikkipinta ja suojaputki, niin sitä suurempi on metalliputken halkaisija. Jos suojaputken halkaisija on 140 mm, voidaan käyttää esimerkiksi markkinoilla olevia 323,9 mm tai 355,6 mm ruostumatonta hitsattua teräsputkea, jonka paksuudet ovat 2,00 ja 2,50 mm. Tällaisten ruostumattomien teräsputkien yksikköhinnat ovat noin 55 – 75 €/m. Voidaan tehdä myös oletus, että ruostumattoman teräsputken asennus on samanhintaista kuin betonielementin asennus.

Suojauksena voidaan käyttää myös umpinaista betonielementtiä (kuva 10), jossa kansielementti on niin sanotusti pysyvästi kiinni muussa elementissä. Kaapelit on tällöin suojattu joka suunnasta tulevilta iskuilta eikä esimerkiksi kansielementin siirtymisestä ole huolta. Suojaus koostuu siis yhdestä osasta ja on siten hieman helpompi ja nopeampi asentaa kuin kaksiosainen betonielementti. Elementit pysyvät kiinni toisissaan rosterilattojen avulla. Umpinaisen betonielementin hinta on samaa suuruusluokkaa kuin betonielementillä, jossa on erillinen kansi. Ja tästä seuraten asennuskustannukset ovat myös samaa luokkaa.



KUVA 10. Kaapelit umpinaisessa betonielementissä

3 KAAPELEIDEN KUORMITETTAVUUS

Kuormitettavuudella tarkoitetaan vaihejohtimessa kulkevaa virtaa ja tehoa, joka voidaan siirtää kaapelin avulla. Kuormitettavuuteen vaikuttaa kaapelin poikkipinta, rakenne, asennustapa ja asennusolosuhteet sekä muun muassa kosketuspiirin maadoitustapa.

3.1 Asennus kolmioon

Kaapelit voidaan asentaa vierekkäin joko kolmioon tai tasoon. Asennuskuvion valintaan vaikuttavat muun muassa kuormitettavuus, asennusolosuhteet ja kosketussuojan kytkentätapa. (Suomi 2010, 6). Kaapeli lämpenee eri tavalla asennustavasta riippuen.

Kolmioasennuksessa (kuva 11) vaihevirtojen magneettikentät kumoavat toisiaan, jolloin kaapelin kosketussuojissa kiertävät virrat pienenevät ja kuormitettavuus kasvaa tasoasennukseen verrattuna, kun kosketussuojapiiri on suljettu. Kosketussuojien kytkentätavat on esitetty luvussa 3.4. Kasvattamalla kaapeleiden etäisyyttä toisistaan magneettikentän vaikutusalue suurenee, mutta huippuarvo pysyy ennallaan. Vaihevirtojen aiheuttamat magneettikentät eivät kompensoi tällöin toisiaan lähikentässä. Luvussa 4.2 on tarkasteltu asiaa lähemmin. Etäisyyttä kasvattamalla saadaan kuormitettavuutta parannettua, kun kaapeleiden kosketussuojapiiri on avoin tai vuoroteltu. Kolmioasennuksessa kaapelit on kuitenkin useimmiten edullisinta asentaa kiinni toisiinsa rajatun asennustilan takia.



KUVA 11. Kaapelit asennettuna kolmioon (ABB)

3.2 Asennus tasoon

Mitä suuempi on kaapeli, sitä suuremmat ovat kuormitettavuuserot taso- ja kolmioasennetuilla kaapeleilla. Tämä johtuu johdinhäviöiden ja kosketussuojan tehohäviöiden suhteesta. Pienien kaapeleiden keskinäinen lämpövaikutus korostuu, jon-

ka takia tasoasennus on kuormitettavuuden kannalta parempi vaihtoehto kolmioasennukseen verrattuna vain pienimmällä alumiinijohtimella. (Suomi 2010, 27)

Tasoasennusta käytetään sen epäedullisten ominaisuuksien takia vain paikoissa, joissa kolmio asennusta ei voida käyttää. Kolmioasennusta käytetään eritoten silloin, kun tilaa on sivuttaissuuntaisesti vähän sekä kaupunkialueella, jossa magneettikenttien rajoittaminen on myös tärkeää. Kaapeleiden väliin jätettävä tyhjä tila yleensä parantaa jäähtymisolosuhteita ja suurentaa näin kaapelin kuormitettavuutta. Koska kaapeleiden etäisyydellä on tasoasennuksessa suurempi vaikutus kuormitettavuuteen, kaapeleiden suositeltu etäisyys on johtimen halkaisija d . (kuva 12). Luvussa 4.2 on esitetty tasoasennuksessa syntyvien magneettikenttien teoreettisia arvoja.



KUVA 12. Kaapelit asennettuna tasoon. Lähde (ABB) mukailen

Luvussa 2.3 esitetyn anturamuotin sisältämä rauditus voi aiheuttaa ongelmia kuormitettavuudelle tasoasennuksessa. Mitä suurempi virta kaapeleissa kulkee, sitä suuremman virran se indusoi ympäröiviin rautaosiin. Pienillä kuormitusvirroilla (n. 100 A) tämä ei aiheuta ongelmia, mutta kun kyseessä on kymmenkertaiset virrat, rautaosissa syntyvien lisätehohäviöiden lämpövaikutus on jo suuri. Kolmioon asennetut kaapelit eivät aiheuta ympärilleen yhtä suuria magneettikenttiä toisin kuin tasoon asennetut kaapelit tai yksittäiset kaapelit.

3.3 Vierusmateriaalit

Kun kaapelin vierusmateriaalilla on huono lämmönjohtavuus, voidaan kaapelin kuormitettavuutta parantaa ympäröimällä kaapeli paremmin lämpöä johtavalla materiaalilla. Vierusmateriaalin tarkoitus on täyttää kaapelin ympärille jäävä tila sekä lisätä kaapelin kuormitettavuutta johtamalla lämpöhäviöt pois kaapelista mahdollisimman hyvin. Asennuksessa käytettävät yleisimmät vierusmateriaalit/täyteaineet ovat hiekka, betoni ja weak-mix.

Mitä suurempi on vierusmateriaalin lämmönjohtavuus ($W/K\cdot m$), sitä paremmin se johdattaa kaapelista virran aiheuttaman, lämmön pois. Usein puhutaan myös lämpöresistiivisyydestä ($K\cdot m/W$), joka on lämmönjohtavuuden käänteisluku. Tällöin mitä pienempi on materiaalin lämpöresistiivisyys, sitä paremmin lämpö siirtyy pois kaapelista.

Materiaalin lämmönjohtavuuden avulla voidaan määrittää materiaalille korjauskerroin, joita käytetään kaapeleiden kuormitettavuuslaskelmissa. Taulukossa 2 on esitetty eri materiaalien lämpöresistiivisyyksiä ja korjauskertoimia. Mitä pienempi lämpöresistiivisyys sitä parempi korjauskerroin.

TAULUKKO 2. Lämpöresistiivisyyden vaikutus kuormitettavuuteen (korjauskertoimet: Prysmian Oy 2012 ja sähköturvallisuusmääräys A1-1993)

Materiaali	Km/W	Korjauskerroin
· kuiva hiekka (kosteus 0 %)	3,0	0,6
· kuiva sora ja savi	1,5	0,9
· bentoniitti (luonnonsavi)	1,3	-
· puolikuiva sora, suomuta tai hiekka (kosteus 10 %)	1,2	0,9
· puolikuiva savi ja kostea sora	1,0	1,0
· kostea savi ja hiekka (kosteus 25 %)	0,7	1,1
· betoni	0,6	>1,1
· weak-mix	< 1,0	-

Hiekka on käytetyin vierusmateriaali sen edullisuuden ja hyvän saatavuuden takia. Betonilla on paras lämmönjohtavuus ja siksi se on taas käytetyimpiä vierusmateriaaleja esimerkiksi erikoiskohteissa, joissa kuormitettavuus on kriittinen muista lämmönaiheuttajista johtuen. Kaapelin kuormitettavuus laskee myös asennussyvyyden ja asennusympäristön takia ilman lämmönaiheuttajia, esimerkiksi kuivan hiekkamaan takia. Betoni voidaan valmistaa eri lujuusluokkiin ja on siten muunneltavissa tarkoituksen mukaiseksi. HSV on käyttänyt anturamuotin täyteaineena K25-lujuusluokan betonia ja betonielementeissä K40-lujuusluokan betonia.

Weak-mix on sekoitus sementtiä, hiekkaa ja vettä, joiden suhteita muuttamalla voidaan muodostaa haluttua massaa. Kaapeliprojekteissa haluttu massa on kestävä, kovaa ja kevyttä, jotta kaapeli tai suojaputki ei vaurioituisi ja kaapelin luokse olisi helppo päästä tarvittaessa myös myöhemmin. Weak-mixin lämpöresistiivisyys riippuu sen kosteudesta. Kuivana se on enimmillään 1,2 Km/W ja märkänä 0,5 Km/W. Yleisimmin jäädytään kuitenkin alle 1 Km/W. (Millar 2005)

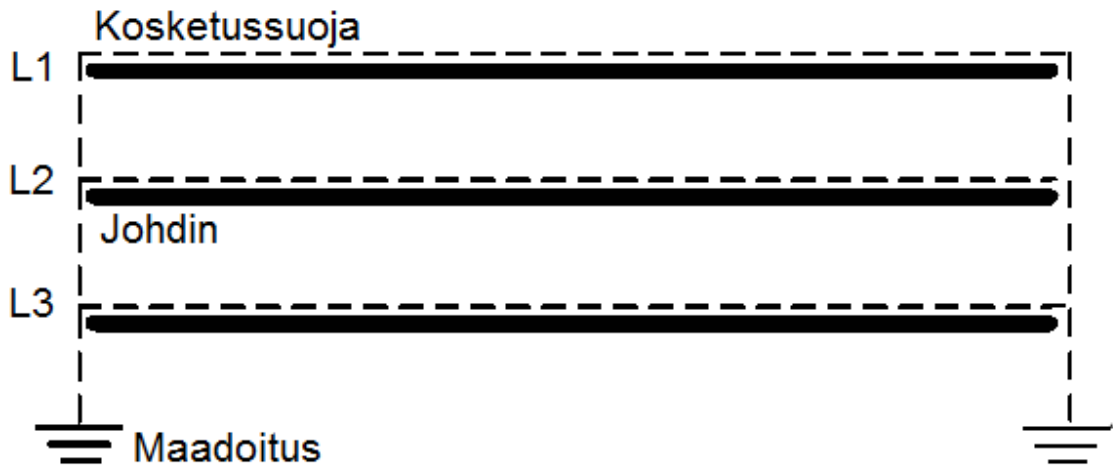
Asennusympäristöksi lukeutuvan maan lämpötila vaikuttaa myös kaapelin kuormitettavuuteen vierusmateriaalin tavoin. Kaapelit on normaalisti mitoitettu asennusolosuhteisiin, jossa maan lämpötila on +15 celsiusastetta ja lämpöresistivisyys 1,0 Km/W (SFS 6000-523). Riippuen johdinlämpötilasta on kuormituksen korjauskerroin noin 0,95 maan lämpötilan ollessa +20 celsiusastetta, jonne maan lämpötila voi nousta pitkänä kuivina hellekesinä asfaltin alla kaupunkiolosuhteissa. Routarajan yläpuolella -5 celsiusasteessa kuormitettavuuden korjauskerroin on noin 1,16. (Prysmian Oy 2012)

3.4 Kaapelin kosketussuojan maadoitustavat

Kaapelin kosketussuojan tarkoitus on maadoittaa käytönaikaiset varaus- ja vikavirrat. Kosketussuoja voidaan maadoittaa vain toisesta päästä tai molemmista päistä. Vaihtovirta aiheuttaa maadoitustavasta riippuen erisuuruisia pyörrevirtoja kaapeliin, mikä aiheuttaa häviöitä ja vaikuttaa kuormitettavuuteen. Maadoitustapa vaikuttaa taas kosketussuojassa kiertäviin virtoihin.

3.4.1 Maadoitus molemmista päistä (Solid bonding)

Maadoittaminen kaapelin molemmista päistä on yksinkertaisin tapa suojata kaapeli kosketusjännitteeltä sekä vikavirroilta ja on sopivin pitkille matkoille. Tällöin myös kosketussuojat ovat kytketty yhteen, jolloin maadoittaminen molemmista päistä aiheuttaa induktiojännitteitä. Jännitteet aiheuttavat kiertäviä virtoja kosketussuojoihin, mitkä taas aiheuttavat tehohäviöitä. Maadoittaminen molemmista päistä aiheuttaa teoriassa myös virtapiirin maan kautta kaapeliin (kuva 13) ja aiheuttaa sitä kautta lisää tehohäviöitä. Jos 3-vaiheinen kaapeli-asennus on symmetrinen ja vaihevirta symmetrinen, niin maan kautta kulkeva virta on kuitenkin nolla. Molemmista päistä maadoittaminen ei indusoi suuria jännitteitä kosketussuojaan ja maadoitusimpedanssi on pieni, jolloin ei erillistä vaippajännitteen rajoitinta (SVL=sheath voltage limiter) tarvita. (Kaiser 2012) Vaippajännitteen rajoitin on ylijännitesuoja, joka estää järjestelmässä indusoituneen jännitteen kasvun vaipassa vian aikana. Kyseistä maadoitustapaa voidaan käyttää pienivirtaisilla kaapeleilla, koska tällöin kuormitettavuus ei oleellisesti heikenny sekä suuri- virtaisilla kaapeleilla kolmioasennuksessa.



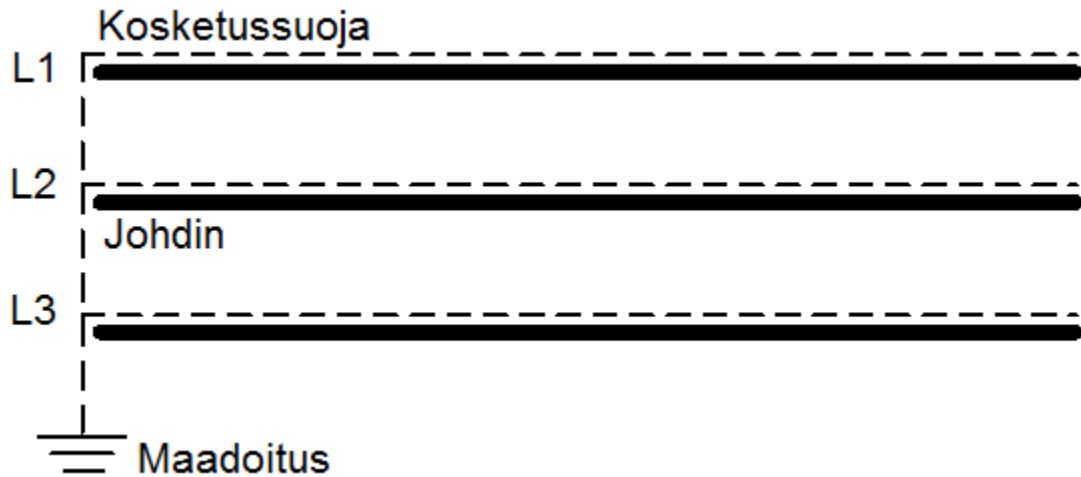
KUVA 13. Suljettu kosketuspiiri. Lähde (Suomi 2010) mukailen.

HSV käyttää tätä maadoitustapaa sähköasemien välisillä yhteyksillä. Pitemmillä matkoilla ja suuremmin kuormitetuilla kaapeleilla käytetään maadoitustapana joko vain toisesta päästä maadoittamista (single bonding) tai cross-bondingia, koska kosketussuojapiiriin ei synny kiertäviä virtoja, jolloin käytönaikaiset tehohäviöt ovat pienemmät ja kuormitettavuus on parempi.

3.4.2 Maadoitus vain toisesta päästä (Single bonding)

Jotta tehohäviöt saadaan pienemmiksi, voidaan kaapeli maadoittaa vain toisesta päästä (kuva 14). Tällöin ei synny maadoittamisesta johtuvaa virtapiiriä kosketussuojoihin, eikä ylimääräistä lämpenemistä tapahdu. Kaapelin maadoittamattomaan päähän syntyy kuitenkin pysyvä potentiaaliero kaapelin kosketussuojan ja maan välillä, jonka takia kaapeli on suojattava toisesta, maadoittamattomasta, päästä vaippajännitteen rajoittimella (SVL). Jännite-ero kasvaa virran ja kaapelin pituuden mukaan, joten tämä tapa ei sovelu pitkille matkoille.

Jotta jännite-ero ei kasvaisi niin suureksi, että ulkovaipan läpilyönti on mahdollinen, on kaapelin pituus rajoitettava. Yleensä tätä ratkaisua käytetään alle 1 km pituisilla johtimilla. (Suomi 2010, 10) Maadoitetusta päästä aiheutuu myös virtoja maasulun aikana, kun vikavirta kulkee vaihejohtimesta kosketussuojan kautta maadoitukseen.



KUVA 14. Avoin kosketuspiiri. Lähde (Suomi 2010) mukailen.

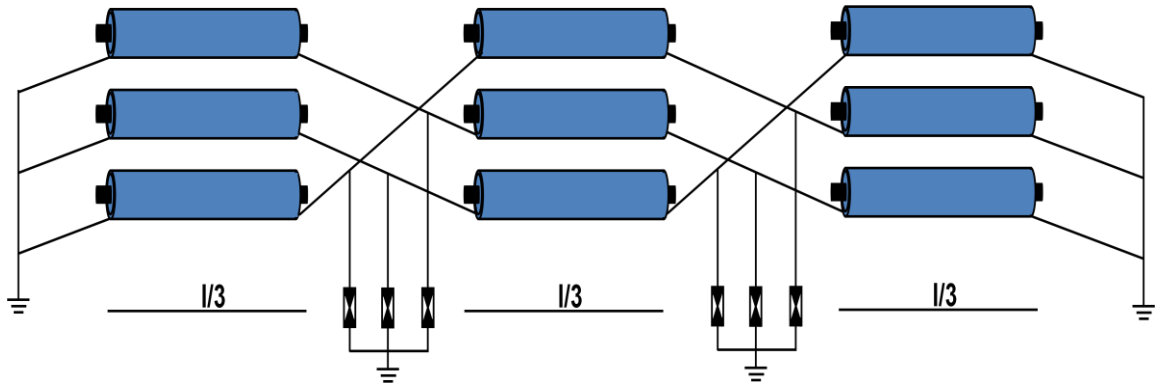
Jos jännite kasvaa kaapelin loppupäässä kohtuuttoman suureksi, voidaan maadoituskoh-
ta sijoittaa myös kaapelin keskelle. Tällöin jännitteenrajoitin pitää pistää kaapeliyhtey-
den kumpaankin päähän. (General Cables 2005)

3.4.3 Cross-bonding

Kolmas kosketussuojan maadoitustapa on käyttää cross-bondingia (vaippavuorottelu).
Kaapeli maadoitetaan molemmista päistä ilman maan kautta kulkevaa virtapiiriä (kuva
15) ja sen aiheuttamia häviöitä.

Kaapelin kosketussuojat vuorotellaan ristiin vaiheiden välillä ja maadoitetaan epälineaa-
risten vastusten kautta, mikä rajoittaa jännitteen kasvua kosketussuojissa. (Lucas 2001,
67) Niin kuin avoimen kosketussuojan tapauksessa jokaisen kolmen vaiheen
magneetikentät indusoivat 120° vaihesiirrossa olevan jännitteen kosketussuojaan.
Ihannetapauksessa vaihejännitteiden summa on 0, mutta käytännössä
ympäristöolosuhteet ja kaapelin pituuden vaihtelut aiheuttavat pienen jänniteyliäämän
ja pienen, merkitsemättömän virran. Koska virtaa ei kulje kosketussuojissa, ei
myöskään tehohäviöitä synny.

Cross-bonding on paras ratkaisu pitkillä kaapeliyhteyksillä ja suositeltavaa tasoon asen-
netuilla kaapeleilla. Jotta maadoitus olisi onnistunut, pitää vuorottelu tehdä kuitenkin
vähintään kahteen kohtaan yhden kaapeliyhteyden aikana. Jos kaapelit on asennettu
kolmioon, itse kaapeleita ei tarvitse vuorotella vaan riittää, että kosketussuojat
vuorotellaan.



KUVA 15. Kosketussuojien vuorottelu (Kaiser 2012)

Cross-bonding on kaikkein kallein vaihtoehto, koska se vaatii erilliset kytkentäkotelot (*linkbox*) (kuva 16) risteytyskohtiin, jossa vuorottelut tehdään. Näissä risteytyskohdissa voi vaipassa esiintyä jännitteen nousua.

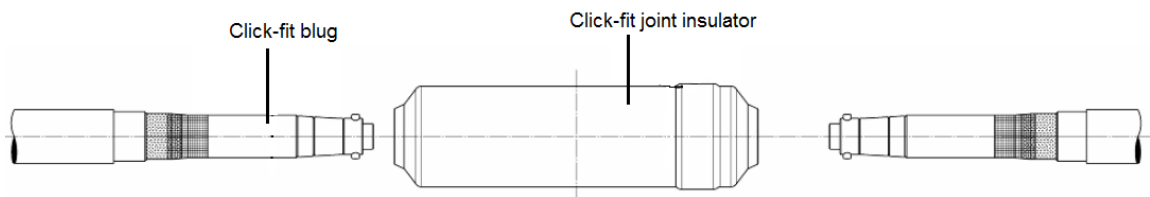
Kytchentäkotelon voi sijoittaa maanpinnan alle tai päälle. Maan alle sijoitettu kotelo kannattaa sijoittaa sille tehtyyn tilaan, esimerkiksi kaivonrengasta käyttäen, jolloin tarkastusmittaukset ja huoltotoimet ovat mahdollisia. Yleensä on myös rajoitteita sen suhteen mihin kohtaan risteytyksen voi tehdä, mikä täytyy ottaa huomioon suunnittelussa. Tällaisia ovat esimerkiksi muut infrarakennelmat. Kolmivaiheisen päätelaatikon mitat ovat luokkaa 400x200x400 (mm) riippuen valmistajasta.



KUVA 16. Kytchentäkotelo pienillä kaapeleilla (Tyco Electronics Corporation 2013)

"Cross-bondaukseen" tarvitaan erilainen jatkos, josta esimerkiksi Prysmian Oy käyttää nimitystä click-fit (kuva 17). 110 kV:n kaapeleille voidaan yleisesti käyttää teippi-/paistojatkosta, kun kaapelin koko on 1200 mm² tai pienempi. Tätä suuremmilla kaapeleilla tarvitaan click-fit -jatkos. Click-fit -jatkos voi olla joko suora- tai cross-bonding -jatkos.

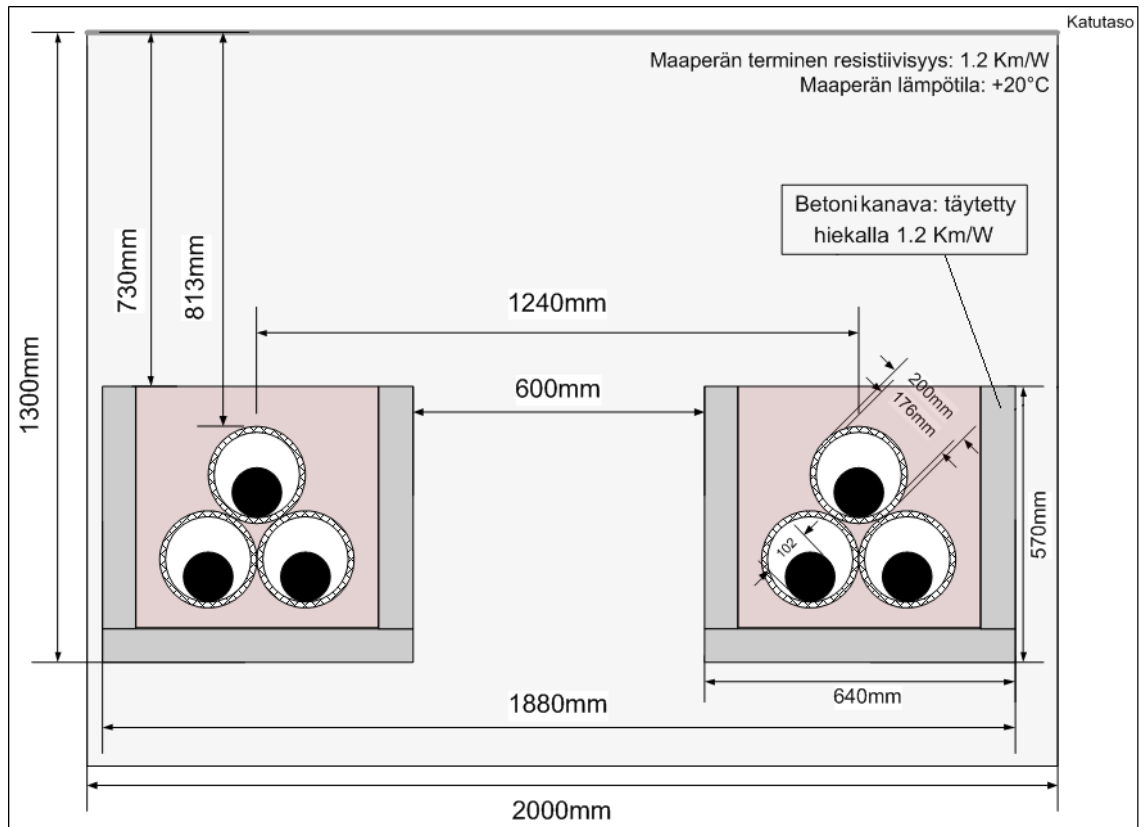
Cross-bonding -liitosmateriaalit ovat noin 10 % kalliimpia ja liittäminen (sisältää link-boxin asennuksen) vie noin 15 % enemmän aikaa, jos verrataan suoraan liitokseen. (Törrönen 2013)



KUVA 17. Cross-bonding click-fit -jatko (Prysmian Oy 2009)

3.4.4 Esimerkkitapaus

Taulukossa 3 on esitetty teoreettisia kuormitettavuus- ja häviölaskelmia eri kosketus-suojan maadoitustavoilla tilanteessa, jossa kaksi kaapeliyhteyttä on 600 mm päässä toisistaan suojattuina betonielementeillä. Kaapelit ovat asennettuna suojaputkeen kolmi-oon ja betonielementti täytetty hiekalla. Kaapelin halkaisija on 102 mm ja siirrettävä teho 200 MVA (kuva 18). Kaapelin tyyppi HXLMK-W 1x1600.



KUVA 18. Esimerkkitalanne (Prysmian Oy)

TAULUKKO 3. Kaapelin kuormitettavuus ja häviöt eri kosketuspiirin kytkentätavoilla (Prysmian Oy)

Kuormitettavuus ja häviöt			
Kosketussuojan maadoitustapa	Single point bonded	Solid bonded	Cross bonded
Kuormitettavuus [A]	1045	685	1045
Johtimen vaihtovirta resistanssi [Ohm/km]	0,0146	0,0146	0,0146
Siirretty teho yhdessä virtapiirissä [MVA]	199	130	199
Vaipan häviökerroin	0,0290	1,5857	0,0290
Johtimen häviöt vaihetta kohti [W/m]	15,9	6,8	15,9
Kosketussuojan häviöt vaihetta kohti [W/m]	0,5	10,8	0,5
Eristeen dielektriset häviöt vaihetta kohti [W/m]	0,4	0,4	0,4
Kosketussuojaan indusoitunut jännite [V/km]	97,6	0,0	0,0

Laskelmat on tehty kolmen samanpituisen cross-bonding -jakson jälkeen. Tällöin yhteen cross-bonding -jaksoon indusoituu sama jännite kuin avonaisen kosketuspiirin tapauksessa, ja jännitteiden summa on kolmen cross-bonding -jakson jälkeen nolla.

Vaipan häviökerroin on laskettu kosketussuojan tehohäviöiden suhteesta johtimen tehohäviöihin.

Taulukosta 3 huomataan, että maan kautta kulkeva virtapiiri aiheuttaa suljetussa kosketuspiirissä teoreettisesti häviöitä (*metallic screen losses per phase*) noin 11 W/m ja avoimaiseen kosketussuojaan indusoitunut jännite (*induced voltage to screen*) on noin 98 V/km.

Liitteessä 1 on esitetty samat kuormitettavuus ja häviölaskelmat cross-bonding tekniikalla eri suojaustavoilla: muovi-, teräs- ja ruostumattomalla teräsputkella.

Taulukossa 4 on esitetty yhteenveto kosketussuojan maadoitustavoista.

TAULUKKO 4. Maadoitustapojen edut, haitat ja käyttökohteet

Maadoitus-tapa	Edut	Haitat	Käyttö
Solid	-yksinkertainen -pieni maadoitusimpedanssi -vikavirralla kaksi kulkureittiä (pienempi lämpörasitus kosketussuojalle 1-vaiheisen vian aikana) -ei jännitteenrajoitinta	-kiertävät virrat kosketussuojissa -tehohäviöt -maan kautta kulkeva virtapiiri	-pienivirtaisilla kaapeleilla -sähköasemien välisillä yhteyksillä -suurivirtaisilla kaapeleilla kolmioasennuksessa -pitkillä kaapelivedoilla
Single	-kosketussuojaan ei synny virtapiiriä -pienemmät tehohäviöt	-pitkillä yhteyksillä läpilyönnin mahdollisuus ulkovaipassa -rajoitettu kaapelin pituus -potentiaaliero maadoittamattomassa päässä	-lyhyillä matkoilla
Cross	-kosketussuojiin ei synny virtapiiriä -ei potentiaalieroa -induktiojännitteet kompensoituvat	-kallis toteuttaa -suurimmat asennustyöt -liitosmateriaalit kalliimpia	-pitkillä kaapelivedoilla -suurilla kuormitusvirroilla

3.5 Kaapeleiden lämpötilanvalvonta

Osa kaapeleissa tapahtuvista vioista voi johtua siitä, että kaapelin lämpötila ylittää sille määritellyn maksimirajan. Tämä voi johtua kaapelin kuormitettavuuden yllättävästä lisääntymisestä tai kaapelin ulkopuolisista tekijöistä. Ulkopuolisia tekijöitä ovat esimerkiksi läpiviennit, jolloin kaapeli voi olla kosketuksissa materiaaliin, jolla on huono lämmönjohtavuus. Tällöin kaapelin kuormitettavuudesta syntyvä lämpö ei pääse johtumaan pois kaapelista odotetulla tavalla kyseisessä pisteessä (*hot-spot*). Myös muu infrastruktuuri, kuten kaukolämpövesiputket, voivat lämmittää kaapelia pisteittäisissä ei-toivotuissa kohdissa

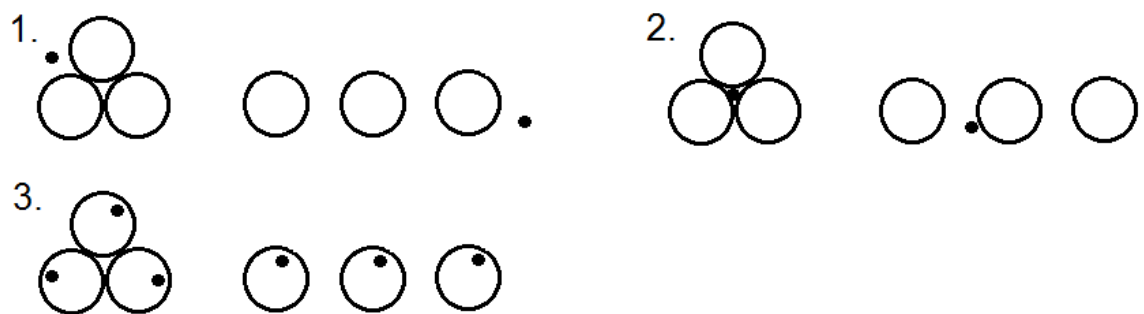
Kaapeleiden siirtokyvyn turvallinen optimointi edellyttää kaapeleiden lämpötilatiedon tuntemista reaaliajassa. Jatkuvaa lämpötilanvalvontaa voidaan näin soveltaa myös maanalaisiin kaapeleihin ja siitä saadun informaation avulla voidaan siten saada ennakoitavin toimenpitein lämpenemisestä johtuvat vikataajuudet pienenemään tai kokonaan poistumaan. Tässä opinnäytetyössä käsitellään kaapeleiden lämpövalvontaa (CTM, *Cable thermal monitoring*), joista hajautettu lämpötilanvalvonta (DTM, *Distributed temperature monitoring*) on yleistynyt kaapeleiden lämpötilanmittausjärjestelmänä.

DTM -mittausjärjestelmä koostuu kolmesta osasta: optisesta kuidusta, prosessiyksiköstä (DTS, *distributed temperature sensing*) ja siihen liitettävästä tietokoneesta. Käytännössä kaapelin lämpötilanvalvonta toteutetaan asentamalla kaapeliin valokuitu ja päätelaite. Järjestelmän hinta voi vaihdella käyttäjän tarpeiden mukaan noin 30 000 - 200 000 € välillä.

3.5.1 Optinen kuitu

Kuitua käyttämällä saadaan varmuutta lämpötilanmittaukseen ja se on itsessään immuuni sähkömagneettisille häiriöille. Kuidun hyviä puolia on myös se, että siinä ei ole liikuvia osia ja se on helppo ottaa käyttöön.

Optinen kuitu voidaan asentaa joko kaapeliryhmien ulko- tai sisäpuolelle (kuva 19). Kuitu suositellaan asennettavaksi kaapelin sisään, jolloin mittaustuloksiin ei tule väärinkäsityksiä ja virheitä ympäristöolosuhteista. Ulkopuolella oleva kuitu on hinnaltaan edullisempi, mutta epävarmempi ja vaatii muun muassa kalibrointia.



KUVA 19. Kuidun eri asennusvaihtoehtoja: 1. kuitu kaapeliryhmän ulkopuolella, 2. kuitu kaapeliryhmän sisäpuolella, 3. kuitu upotettuna kaapeleihin asennusvaiheessa (suositeltavaa)

Kuitu tarvitsee ympärilleen pienen putken, jonne se voidaan sijoittaa. Yhteen putkeen voidaan laittaa 2-4 kuitua ja putkia voidaan laittaa kaapeliin 1-4. Kaapelissa putki asennetaan esimerkiksi kosketussuojakerrokseen (kuva 20) tai kaapelin lyijyvaipan päälle. Kuitu suositellaan asennettavaksi kosketussuojakerrokseen, sillä toisessa tapauksessa kaapelin rakennetta joudutaan muokkaamaan valmistuksen aikana kuidun takia, mikä saattaa heikentää kaapelin ominaisuuksia. Alumiini- ja kuparilaminaattisen johtimen kosketussuojassa johtimista 1-4 korvataan kuidun tarvitsemilla metalliputkillilla. Koska kuidun voi nähdä lyijyvaipan päälle sijoitettuna johtimen pinnalla kohoumana, on se herkempi myös ulkopuolisille painaumille.



KUVA 20. Kuitu sisältyneenä kosketussuojakerrokseen (APsensing 2010)

Kuitu voi olla yksi- tai monimuotokuitu. Yksimuotokuidussa signaali etenee suoraviivaisesti kuituytimessä ja sillä on parempi signaalin siirtokyky kuin monimuotokuidulla. Monimuotokuidun signaali vääristyy vastaanottopäässä, sillä signaali vaimenee ja vaihtelee etäisyyden kasvaessa yksimuotokuitua enemmän ja siksi myös yksimuotokuitu soveltuu paremmin pitkille matkoille. Yksimuotokuidulla on heikko takaisin siroutuva signaali, mikä vähentää heijastuvaa tehoa. Mittaukset on tällöin vaikeampi toteuttaa ja mittausajat ovat pidempiä kuin monimuotokuidulla, jolla on tämän takia parempi resoluutio ja tarkkuus. (Rosevear 2004)

Hajautetun lämpötilan mittauksen kuidun maksimi pituus rajoittuu seuraaviin tekijöihin: matkan aiheuttamat häviöt (vaimennus) ja tehon riittävyys. Rajoitusten ylittyessä lämpötilaa ei voida mitata tietyllä resoluutiolla sille määrättyssä ajassa. (Rosevear 2004)

3.5.2 Prosessiyksikkö

DTM systeemin pääkomponentti on prosessiyksikkö (DTS), joka vastaanottaa ja lähettää signaalin. Yksikkö on itsessään tiedonkeruujärjestelmä, joka toimii tiedon ja ulkoi-

sen kontrollerin rajapintana. Yksikkö keskustelee kontrollerin eli käytännössä tietokoneen kanssa, jota järjestelmän käyttäjä käyttää. Yksiköitä on niin sanotusti pitkille matkoille ja keskipitkille matkoille.

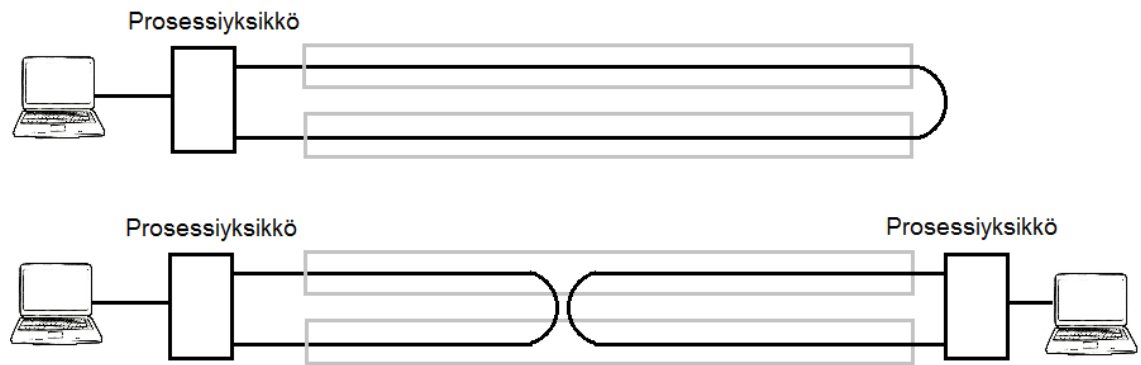
Prosessiyksikkö on spesifioitavissa kyseisen käyttäjän haluamaksi ja tieto on saatavissa halutussa muodossa. Näytteenottotaajuus voidaan määritellä esimerkiksi 5 metristä 25 senttimetriin. Näytteenottotaajuus riippuu käyttäjän tarvitseman informaation tarkkuudesta. Jotta suuremmilta vaimennuksilta vältytään, on suositeltavaa liittää valokuidut prosessiyksikköön suorilla liittimillä ilman välikappaletta.

3.5.3 Asennus ja signaalitieto

Valokuitu voidaan asentaa sekä lyhyille että pitkille matkoille. Mitä pidempi matka on kyseessä sitä tarkemmin lämpötilanmittausjärjestelmä pitää suunnitella. Pitkien matkojen haittapuolena on se, että signaali voi vaimentua voimakkaasti etäisyyden kasvaessa. Tällöin loppupään signaalitieto voi näkyä lämpötilan loivempina nousuina, eikä pieniä muutoksia näe niin tarkasti kuin kuidun alkupäässä. Signaali vaimenee jokaisen liittoksen ja jatkon kohdalla, ja pitkillä matkoilla (esimerkiksi 5 km) liittoksia voi tulla useita. Tämä vaatii jokaisen liittoksen huolellista tekemistä ja tarkastamista. Jos loppupään vaimenemista tapahtuu, voi tarvittaessa käyttää järjestelmää, joka summaa molemmista päistä lähtevät signaalitiedot yhteen.

Kaapeliyhteyksillä pienillä lämpötilanvaihteluilla ei ole niin paljon merkitystä, joten esimerkiksi 5 asteen tarkkuus on sopiva. Tällöin ei haittaa, jos lämpötilanmittaus ei reagoi jokaiseen pieneen lämpötilan nousuun hetkessä.

Kuvassa 21 on esitetty kuidun mahdollisia asennusvaihtoehtoja. Ylemmässä kuvassa silmukka on vedetty kaapelireitin kokopituudelta ensin ensimmäisessä vaiheessa ja takaisin tullessa toisessa vaiheessa. Alemmas kuvassa on tehty kaksi eri silmukkaa kummastakin kaapelin päästä. Tällöin tarvitaan kaksi erillistä prosessiyksikköä. Kuituja voi olla useampi samalla reitillä eri käyttötarkoituksiin.

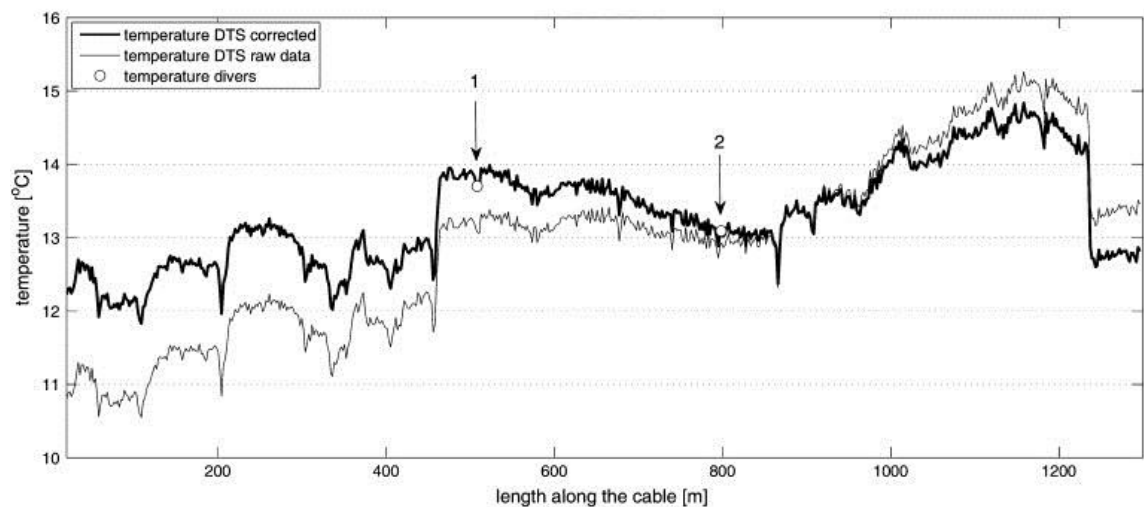


KUVA 21. Kaksi havainnointiesimerkkiä valokuidun asentamisesta kaapelireitille

Signaalitiedon oikeellisuuden varmistamiseksi, voidaan yksi kuitu varata niin sanotuksi referenssiksi, joka kulkee muista erillään.

Valokuidun tiedon luotettavuuden lisäämiseksi, se kannattaa ennen käyttöä ja käytön aikana kalibroida. Koska kuitu kiertää loivasti kaapelia vaipan alla, on sen pituus hie- man suurempi kuin itse kaapelin. Asennusvaiheessa ennen kaapelikaivannon täyttöä, voidaan kaapelin pintaa lämmittää eri kohdissa kaapelia ja lukita lämpötiedon paikka kaapelireitille. Pitkillä matkoilla kaapeli voidaan myös käyttää niin sanotussa lämpöuu- nissa, jossa kaapelin päät kalibroidaan samaan lähtötasoon.

Kuvassa 22 on esimerkki mittaustuloksista, jotka saadaan siirrettyä myös Excel- muotoon. Lämpötila on esitetty kuvaajassa kaapelireitin pituuden funktiona. Esimerkis- sä kaapelireitin pituus on noin 1,3 km.



KUVA 22. Esimerkki saatavasta datasta (Sciencedirect.com 2009)

4 MAGNEETTIKENTÄT

Magneettikentät ovat olleet tarkkailun alla 80-luvulta asti, kun tutkimukset ovat osoittaneet, että niistä saattaa suurina määrinä aiheutua ihmiselle terveyshaittoja. (Finergy, 2000) Magneettikentän voimakkuus, taajuus ja altistumisaika yhdessä määrittävät magneettikentille asetetut suositusraajat standardeissa ja suosituksissa. Tässä työssä tarkasteltiin magneettikentän teoriaa lyhyesti sekä tehtiin mittaus maakaapeliyhteydellä Helsingin alueella.

4.1 Teoreettinen tarkastelu

Johtimessa kulkeva muuttuva sähkövirta aiheuttaa ympärilleen muuttuvan magneettikentän, jonka tiheys riippuu virran suuruudesta. Integroimalla Biot'n ja Savartin sähkömagnetismia kuvaavaa lakia suljetun virtasilmukan yli, saadaan ilmukan synnyttämä magneettikentän tiheys B määritettyä mielivaltaisessa pisteessä (kaava 1).

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I \Delta l \times \hat{r}}{r^2} \quad (1)$$

missä $\mu_0 =$ tyhjiön permeabiliteetti, $4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{Vs}{Am} \right]$

$I =$ johtimen virta [A]

$\Delta l =$ virta-alkion differentiaalinen pituusvektori

$\hat{r} =$ yksikkövektori virta-alkiosta tarkasteltavaan magneettikentän pisteeseen

$r =$ etäisyys virta-alkiosta tarkasteltavaan magneettikentän pisteeseen

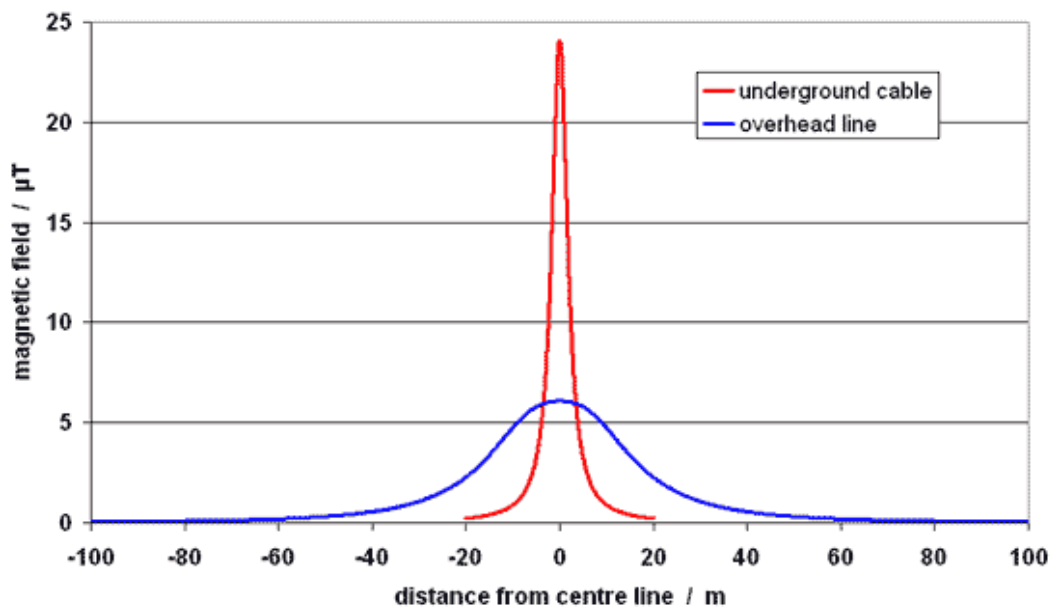
Kaavasta 1 saadaan sievennettyä kaava 2, kun magneettikenttä halutaan laskea etäisyydellä r pitkstä suorasta virtajohtimesta, kun siinä kulkee virta I . (Malmi 2011)

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

Magneettikentän tiheys B saadaan kertomalla magneettikentän voimakkuus H väliaineen permeabiliteetillä μ (kaava 3).

$$B = \mu \cdot H \quad (3)$$

Kaavasta 2 voidaan päätellä, että magneettikentän voimakkuus on suoraan verrannollinen virtaan I ja kääntäen verrannollinen etäisyyteen r . Magneettikentän arvo on maakaapelilla suurimmillaan kaapelin yläpuolella (kuva 23), mutta laskee voimakkaasti jo muutamassa metrissä liikuttaessa kaapelista kohtisuoraan pois päin. Tämä johtuu siitä, että maa-aineen suojaa tehokkaasti magneettikentän vaikutuksilta. Tasoon asennetut kaapelit tuottavat suuremman magneettikentän ympärilleen kuin kolmioon asennetut kaapelit. Maakaapeli aiheuttaa suuremman magneettikentän kuin ilmajohdon magneettikenttä, mutta vaimenee nopeammin. Kuvassa 23 on esitetty magneettikentän periaatteellinen käyrä etäisyyden funktiona maakaapeleilla ja ilmajohdoilla.



KUVA 23. Magneettikentän periaatekäyrä kaapeliasennuskissa (EMFs.info)

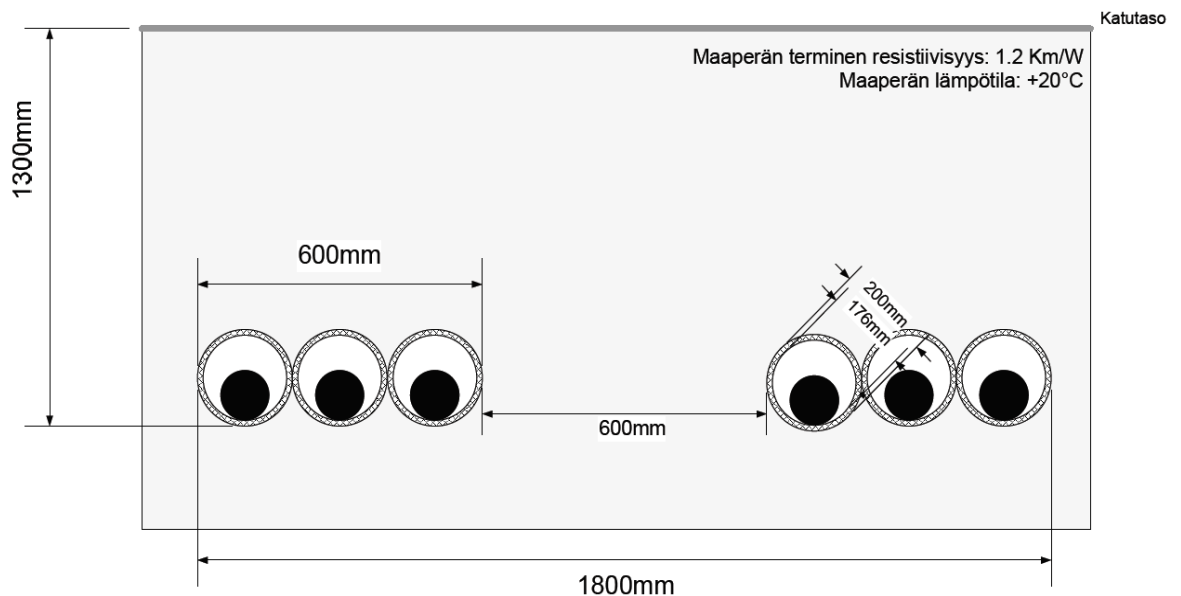
EU:n suosittelemat raja-arvot 50 Hz taajuisille magneettikentille jatkuvassa (24h) altistumisessa ovat $B= 100 \mu\text{T}$ ja $E= 5 \text{ kV/m}$. (Finergy 2000) Ei-merkityksellisessä ajassa arvot ovat $B= 500 \mu\text{T}$ ja $E= 15 \text{ kV/m}$. Näihin EU:n suosituksiin perustuen Suomen sosi- ja terveysministeriö (STM) on laatinut magneettikenttien altistumista koskevan asetuksen vuonna 2002.

4.2 Teoreettisia laskelmia

Seuraavat laskelmat HSV on saanut liittyen erääseen kaapeliprojektiin. Laskelmat on tehnyt Prysmian Oy.

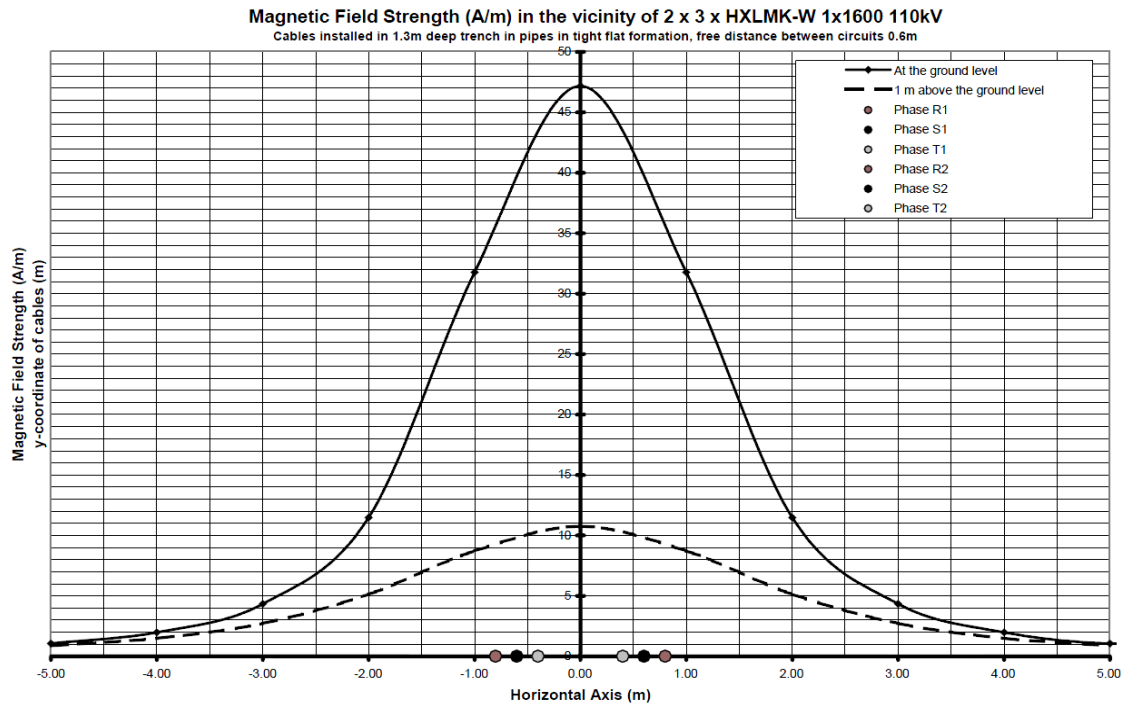
4.2.1 Tasoasennus

Niin kuin luvussa 3.1 jo todettiin, kolmio asennus ei synnytä yhtä suuria magneettikenttiä kuin tasoasennus. Kuvassa 25 on esitetty magneettikentän voimakkuuden käyrät tasoasennuksessa kuvan 24 lähtötilanteessa, jossa kaapelit ovat kiinni toisissaan 1,3 m syvyydessä muoviputkessa.



KUVA 24. Tasoasennuksen lähtötilanne. Yhteyksien välinen etäisyys on 0,6 m. (Prysmian Oy)

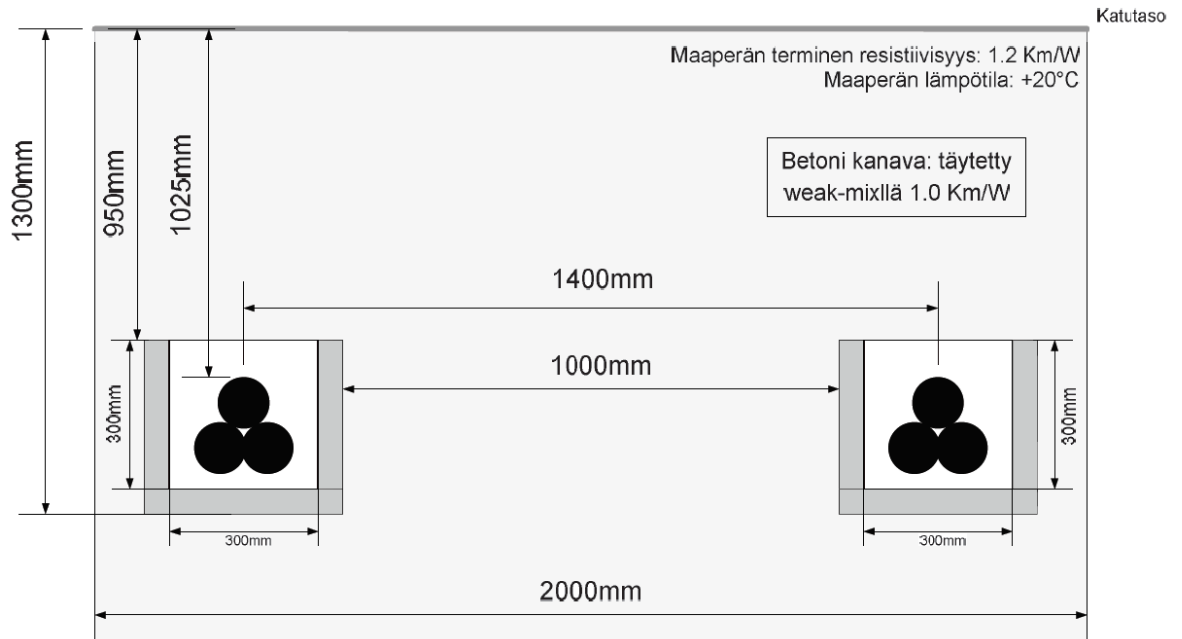
Yhtenäinen viiva magneettikenttiä kuvaavissa kuvissa on magneettikentän voimakkuus maan pinnalla ja katkoviiva magneettikentän voimakkuus yksi (1) metri maan pinnan yläpuolella. Kuvasta 25 huomataan, että magneettikentän voimakkuuden huippuarvo on 47 A/m suoraan kaapelin yläpuolella, mutta jo metrin korkeudella alle 11 A/m. Jos kaapeliyhteydet olisi asennettu kauemmaksi toisistaan, magneettikentän voimakkuus olisi pienempi.



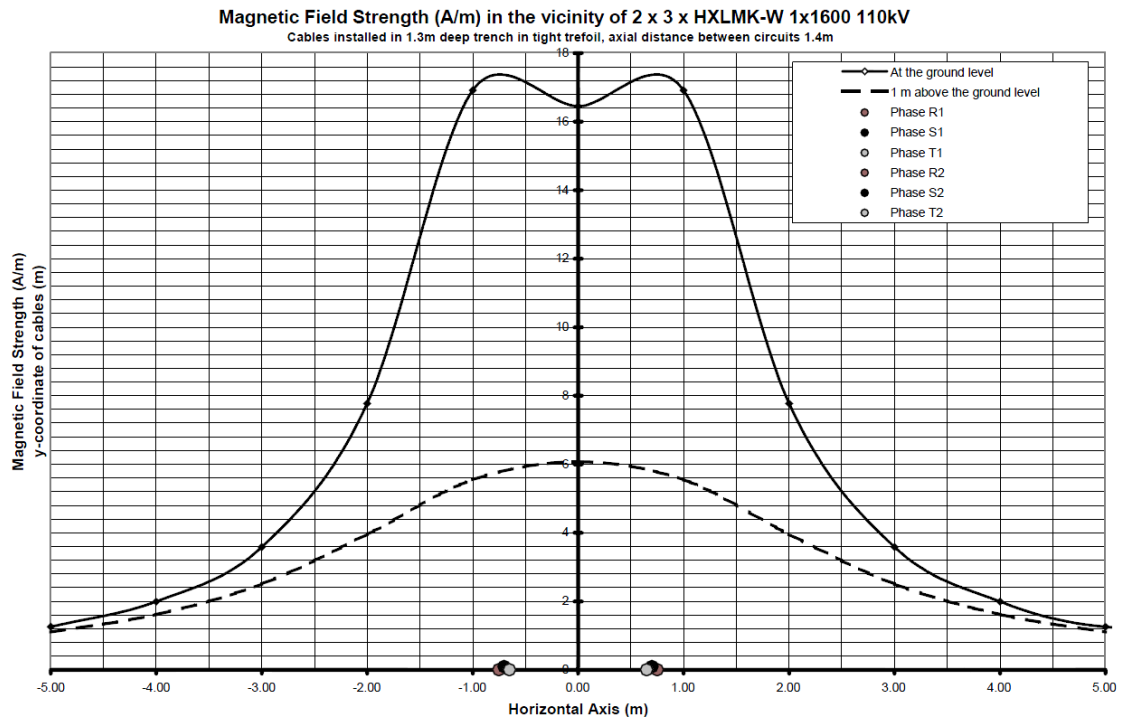
KUVA 25. Magneettikentän laskennallinen käyrä tasoasennuksessa (Prysmian Oy)

4.2.2 Kolmioasennus

Kuvan 26 tilanteessa kaapelit on asennettu kolmioon betonielementissä, jossa ei ole kantta. Betonielementti on täytetty weak-mixillä. Yhteyksillä siirrettävä teho on yhteensä 396 MVA.



KUVA 26. Kolmioasennuksen lähtötilanne. Yhteyksien välinen oleellinen etäisyys 1,4 m. (Prysmian Oy)

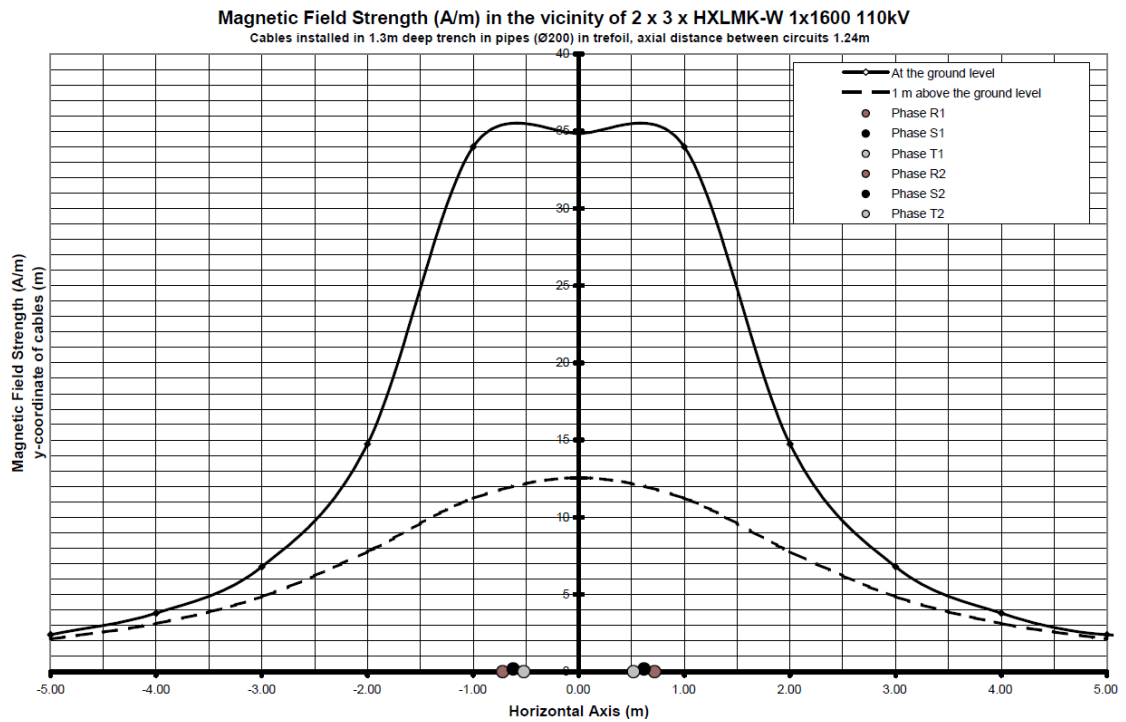


KUVA 27. Magneettikentän laskennallinen käyrä kolmioasennuksessa (Prysmian Oy)

Kolmioasennuksessa magneettikentän voimakkuus ei nouse niin korkealle kuin tasoasennuksessa. Magneettikenttä ei kuitenkaan laske yhtä nopeasti, mikä näkyy siinä, että käyrän huippuarvo saavutetaan kauempana kaapeleiden keskikohdasta ja suoraan kaapeleiden yläpuolella ei sijaitse magneettikentän huippuarvo (kuva 27 ja 28). Tässä tapauksessa huippuarvoksi on saatu 17,4 A/m.

Tilanteessa, jossa lähtötilanne on kuvan 18 mukaiset, magneettikenttien käyrä on esitetty kuvassa 28. Kaapelit ovat putkessa ja täyteaineena toimii hiekka.

Kuvaajan 27 ja 28 eron selittää käytännössä kaapeliyhteyksien välinen eri etäisyys toisistaan.



KUVA 28. Magneettikentän laskennallinen kuvaaja kolmioasennuksessa kuvan 18 mukaisessa tilanteessa. Yhteyksien välinen etäisyys 1,24 m. (Prysmian Oy)

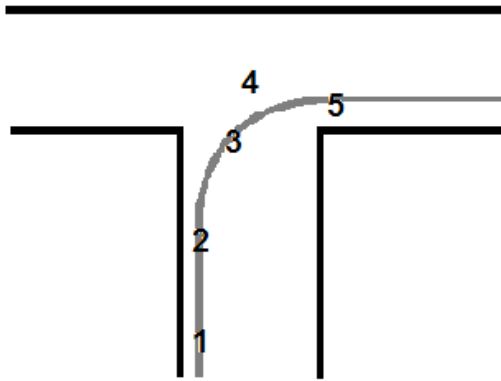
4.3 Magneettikenttämittaus

Mittaukset tehtiin kantakaupungin reitillä 1, jossa 110 kV kaapeli ylittää risteysalueen (kuva 29). Mitattuihin magneettikenttien arvoihin vaikuttaa kaapelin asennussyvyys, asennustapa ja siinä kulkeva virta. Mittaushetkellä kaapeleissa kulki n. 160 A virta.

Kuvassa 29 on esitetty mittauspisteet katujen risteyksessä. Kohdassa 1. kaapelit ovat kolmiossa noin 1 metrin syvyydessä betonielementissä, jolloin magneettikentän arvoksi saatiin 2,1 μT . Kolmioon asennettujen kaapeleiden virroista aiheutuvat magneettikentät kumoavat tällöin toisiaan.

Kohdassa 2 kaapeleita on aseteltu siirtymään rinnakkain asennussyvyyden pysyessä samana. Mitattu arvo oli 3,3 μT . Magneettikentät eivät enää kumoa toisiaan yhtä hyvin kuin symmetrisessä kolmioasennossa (vrt. kohta 1).

Risteyksessä kohdassa 3 kaapelit ovat lähempänä maan pintaa ja kaapelit on asennettu tasoon, mikä vaikuttaa suurentavasti magneettikentän arvoon. Magneettikentän arvoksi saatiin 16 μT .



1. $B=2,1 \mu\text{T}$, kaapelit kolmiossa
2. $B=3,3 \mu\text{T}$, kaapelit siirtymässä rinnakkain
3. $B=16 \mu\text{T}$, kaapelit tasossa
4. $B=8,1 \mu\text{T}$
5. $B=6,0 \mu\text{T}$

KUVA 29. Mittauskohteet

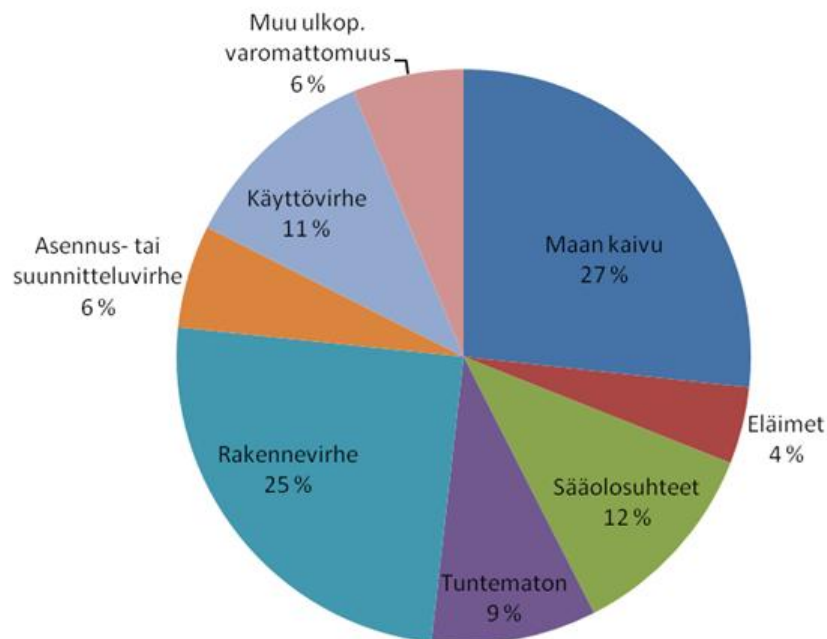
On huomioitava, että risteysalueella, erityisesti kohtien 3-5 alueella, kulkee maan alla paljon muitakin kaapeleita ja lämpöputkia, jotka lisäävät magneettikenttiä.

5 VIKATAAJUUS ILMAN MEKAANISTA SUOJAUSTA

Tässä luvussa tarkastellaan maakaapeloinnin riskiä ja uhkia sekä tilastojen perusteella laskettua vikataajuutta. Kaapeleita käyttäen saavutetaan yleensä ilmajohtoja parempi käyttövarmuus ja kaapeliasennukset ovat siksi kannattava vaihtoehto kaupunkialueilla. Kaapeleiden epäedullisuus avojohtoihin verrattuna on vikojen tarkan paikallistamisen ja korjaamisen hitaus sekä materiaalin (kaapeleiden) ja maanrakennustöiden kalleus. Kaapeleiden vikataajuus keskijänniteverkossa on 10 - 50 % avojohtojen vikataajuudesta. (Lakervi 2009, 146) Tämä arvo tosin hieman muuttuu kaupunkiolosuhteista johtuen. 110 kV:n kaapeleista ei löydy vastaavia vikatilastoja.

5.1 Kaapeliasennusten riskit ja uhat

Vaikka maakaapelit sijaitsevat piilossa maan alla, kohdistuu niihin myös erilaisia riskejä ja uhkia samalla tavalla kuin ilmajohtoihin (kuva 30). 110 kV verkossa näistä ei esiinny eläimistä tai säästä johtuvia vikoja. Suurin vianaiheuttaja 110 kV verkossa on kaivutöiden aiheuttamat viat, joista selvitetään vikataajuudet luvussa 5.2. Vikoja aiheuttaa myös rakenteelliset ja materiaaliset viat kaapeleissa, esimerkiksi kaapelipäätteen hajoaminen tai kaapelijatkon vika, verkon hallinnasta johtuvat viat (huolto- ja käyttötoimenpiteet) sekä tuntemattomat tekijät.



KUVA 30. Vikakeskeytysten prosentuaalinen jakauma HSV:n keskijänniteverkossa vuosina 2002–2012

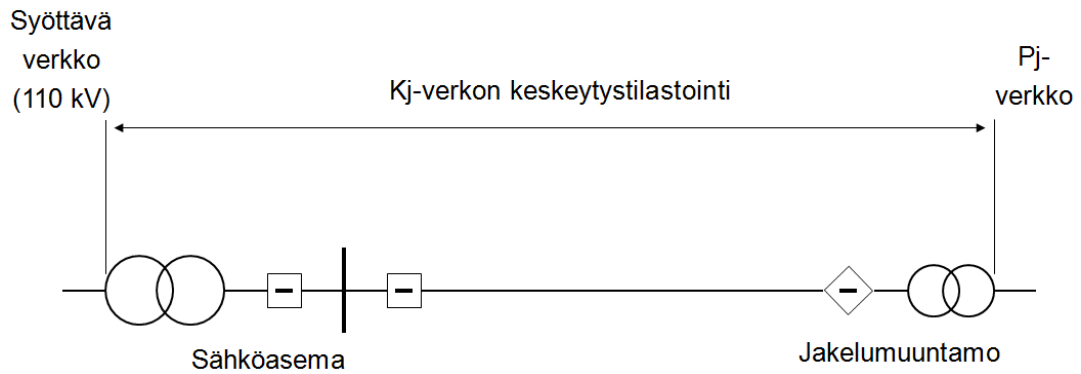
Kaivuvauriot aiheutuvat yleensä työkoneen käyttäjän huolimattomuudesta ja varomattomuudesta, jolloin mekaanisella suojauksella on suuri merkitys kaapeleiden vaurioitumisen ehkäisyssä. Jotta kaivinkone ei rikkoisi kaapelia, pitää suojauksen olla joka puolella, selvästi nähtävissä sekä tarvittavan raskas estettäessä suojan liikkuminen pois paikoiltaan. Kaapeliin saattaa kohdistua myös yllättäviä iskuja, esimerkiksi paalutettaessa tai kairattaessa kaapeliyhteyden lähellä, milloin myös henkilövahingot ovat mahdollisia maasulkuvirtojen takia.

Maa-aineksen ollessa pehmeää, on kaapeleiden liikkuminen mahdollista. Kaapelin ulkovaippa voi hankautua ajan kuluessa kiviin tai maa-aines kulua kaapeleiden päältä, jolloin raskas kasvaa kaapelin ylä- ja alapinnalla, esimerkiksi painavien kuorma-autojen alla. Erityisesti kaapelin korroosiosuoja voi hankautua rikki tai lävistyä pitkän ajan kuluessa, mitä on kaikin tavoin vältettävä (Laasonen ym. 2011, 384). Maa-aineksen siirtymiset voivat aiheuttaa myös lämmön siirtokyvyn muutoksia, jotka vaikuttavat kaapelin kuormitettavuuteen ja lisäävät sitä kautta kaapelivaurioiden riskiä.

Vikojen vähentämiseksi urakoitsijan on aina haettava Helsingissä töillensä kaivulupa kaupungilta ennen töiden aloittamista yleisillä alueilla. Urakoitsijan on ensin tehtävä kaivu ilmoitus ja sitten haettava johtoselvitys sekä sopia lupatarkastajan kanssa aikataulu. Jos kaivualue on lähellä 110 kV kaapelia, on varatoimenpiteiden selvittämiseksi otettava yhteyttä Helsingin alueella HSV:hen. (HKR 2008) Ongelmaa tämä ei kuitenkaan kokonaan ratkaise, sillä urakoitsijat eivät aina noudata kaivulupaprosessia.

5.2 Vikataajuus

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin kuinka suuri teoreettinen vikataajuus 110 kV maakaapeliverkolla olisi Helsingin alueella, jos ei käytettäisi mitään raskasta mekaanista suojausta. Tutkimus tehtiin keskijänniteverkon vikatilastojen avulla, jotka käsittelivät kaivuvaurioita ja muita varomattomia ulkopuolisia aiheuttajia vuosina 2002–2012 (taulukko 6). Keskijännitevikojen vikatilastoinnin rajausta on esitetty kuvassa 31. 110 kV:n kaapelikaivannossa sijaitsee yleensä muitakin kaapeleita. Tässä tapauksessa jakeluverkon kaapelit sijaitsevat 110 kV:n kaapelin yläpuolella noin 0,6 metriä lähempänä maan pintaa.



KUVA 31. Tilastointirajaus (Helen 2012)

Keskijännitevikoja on tapahtunut keskimäärin 40 kappaletta vuodessa ja näistä ulkopuolisesta huolimattomuudesta ja kaivuvarioista johtuen keskimäärin 16 kappaletta (38 %). Vikataajuus λ_v saadaan kun jaetaan vikojen määrä kaapelireitin pituudella (kaava 4).

$$\lambda_v = \frac{\text{vikojen lkm [kpl]}}{\text{reittipituus [km]}} \quad (4)$$

HSV:n keskijänniteverkon pituus vuonna 2012 oli 1575 km. Teoreettisesti lasketuksi vikataajuudeksi saatiin keskimäärin 0,00950 vikaa kilometriä kohden eli kaapeliverkossa tapahtuu yksi (1) vika sataa kilometrin matkalla vuoden aikana, jos kaapelia ei ole suojattu mekaanisesti.

On kuitenkin huomioitava, että 110 kV kaapelit sijaitsevat syvemmällä maaperässä kuin jakeluverkon kaapelit, jolloin vikataajuus teoriassa pienenee, koska kaikki kaivutyöt eivät kohdistu näin syvälle maaperään. 110 kV kaapelit ovat myös erityisesti merkittävä sijaintikartalle tekstillä "110 kV", joka todennäköisesti herättää urakoitsijan huomion varmemmin kuin muut sähkökaapelit.

TAULUKKO 5. Vikatilastot vuosilta 2002-2012

Vuosi	Reittipituus (km)	KJ vikojen määrä yht.	joista ulkopuoliset +kaivuu	Vikataajuus (lk/km)
2012	1575	30	12	0,00762
2011	1561	44	14	0,00897
2010	1541	65	20	0,01298
2009	1525	27	10	0,00656
2008	1482	32	12	0,00810
2007	1487	47	22	0,01479
2006	1462	28	10	0,00684
2005	1435	53	22	0,01533
2004	1422	32	7	0,00492
2003	1411	51	17	0,01205
2002	1411	36	9	0,006379

Taulukosta 5 nähdään, että vikataajuus vaihtelee 0,005 ja 0,015 välillä. Tämä tarkoittaa sitä, että vikoja tapahtuisi teoreettisesti laskettuna vuodesta riippuen 0-2 kpl sataa kilometriä kohden HSV:n 110 kV kaapeliverkossa, jossa kaapeleiden yhteispituus on noin 65 km.

6 MAANRAKENNUSTÖIDEN JA SUOJAUSTAPOJEN YKSIKKÖHINNAT

Kaapeliprojektin hinta koostuu asennusmateriaaleista (kaapelit + kaapelipäätteet, mekaaniset suojausratkaisut ym.), maanrakennustöistä (kaivu, täyttö ym.) sekä työvoimasta (asennus, reittisuunnittelu ym.). Näistä maanrakennustyöt vievät suhteessa suurimman osan projektin budjetista, ja ovat siksi mielenkiintoinen tutkimuskohde. Vaikka kaapelireittiä ei voi rakentaa minne tahansa, voidaan maanrakennuskustannuksissa säästää suunnittelemalla reitti hyvin valitsemalla edullisempi ratkaisu siten, että sähkönsiirron laatu ei siitä kärsi. Järkevin tapa tutkia maanrakennuksen ja mekaanisen suojausratkaisun kustannuksia on käyttää yksikköhintojen vertailua. Yksikköhinnalla tarkoitetaan tässä tapauksessa joko yhden kaapeliyhteysmetrin tai -kilometrin hintaa.

6.1 HSV:n projektien maanrakennustöiden yksikköhintoja

Tässä opinnäytetyössä oli tarkoituksena tutkia miten kaapeliurakan kustannukset eroavat työmaan maantieteellisen sijainnin perusteella. Hypoteesina oli, että keskusta-alueella sijaitsevat työmaat ovat yksikköhinnoiltaan kalliimpia kuin esikaupungissa olevat. Tutkittiin myös mitä eri suojausratkaisut kustantaisivat materiaalin ja asennuksen osalta. Hintavertailuun otettiin mukaan kolme kantakaupungin (kohteet 1, 2 ja 3) ja kaksi esikaupungin (kohteet 4 ja 5) kaapeliurakkaa.

Maanrakennustöiden hinnoissa oli suuria vaihteluita jokaisen urakan välillä. Urakoiden reittipituudet vaihtelivat 100 metristä 2000 metriin, jolloin lyhyemmän reitin kaivutöiden ja viimeistelyn (täyttö + asfaltointi) yksikköhinnat olivat tässä tapauksessa noin 15 - 26 % suuremmat kuin pidemmän reitin hinnat. Yksikköhintoihin vaikuttaa kuitenkin esimerkiksi urakan kiinnostavuus ja työmaan perustamiskulujen jakaantuminen, joten yksikköhintojen prosenttiosuus ovat vain suuntaa antava.

Yksikköhintoihin vaikutti hieman se, rakennettiinko reitille yksi vai kaksi yhteyttä. Esikaupunkialueella kaivutöiden (sisältää päällysteen poiston) yksikköhinnat laskivat, jos yhteyksiä oli kaksi. Kantakaupungissa kaivutyön yksikköhinta ei juuri laskenut yhteyksien lukumäärän kasvun perusteella. Asennuskustannukset eivät laskeneet yhteyksien määrän lisääntyessä, vaan olivat riippuvaisia siitä, mitä suojaustapaa käytettiin. Yksikköhintoja käsiteltiin virtapiirikohtaisina niissä tapauksissa, joissa oli kaksi yhteyttä.

Kaapelireitti kulkee joko asfaltoidun tien kohdalla tai sen vieressä. Kaapeliurakoiden perusteella asfaltointi on noin 50 % kalliimpaa kuin nurmialueen päällystäminen.

Taulukossa 6 on esitetty maanrakennustöiden yksikköhintojen keskiarvot kantakaupungissa ja esikaupungissa. Esikaupungissa olevien kaapeliurakoiden yksikköhinnat ovat keskimäärin noin 50 - 70 % kantakaupungin yksikköhinnoista. Tämä voi johtua muun muassa siitä, että kantakaupungissa on vilkasliikenteisiä teitä, jolloin työt joudutaan tekemään yötyönä. Myös raitiotiekiskojen alitukset lisäävät kustannuksia.

TAULUKKO 6. Maanrakennustöiden yksikköhintojen keskiarvot HSV projektien perusteella

	yksikkö	kantakaupunki	esikaupunki
kaivutyö	€/m	323	156
louhintatyöt	€/m ³	794	531
täyttö ja asfaltointi	€/m	300	168
suojausasenustus + suojausputket	€/m	53	37

Mekaanisella suojausratkaisulla on myös oma hintansa, mikä vaikuttaa kaapeliprojektin kokonaistaloudellisuuteen niin materiaali että asennuskustannuksilla. Taulukossa 7 on esitetty suojausmateriaalien keskimääräiset yksikköhinnat, jotka ovat laskettu HSV:n vuoteen 2012 valmistuneista viidestä kaapeliprojektista. Voidaan huomata, että betonielementti ei ole kaikkein edullisin suojausratkaisu materiaalien osalta. Betonielementtien hinta vaihtelee kuitenkin paljon rakennuttamis sektorin työtilanteen mukaan, mikä voi vaikuttaa saatuihin yksikköhintoihin.

TAULUKKO 7. Materiaalien yksikköhintoja

Suojausmateriaali	Yksikköhinta	
Betonielementti kannella	€/m	154
Anturamuotti	€/m	12
Betonielementin kansi	€/m	38

Taulukossa 8 on esitetty eri suojausratkaisujen yksikköhintoja. Betonielementti sisältää myös kannen yksikköhinnan sekä 3xB-luokan suojausputken asennuksen. Anturamuotin yksikköhinta perustuu esikaupunkialueelta saatuihin tietoihin. Muut yksikköhinnat ovat kantakaupungin kaapeliprojekteista. Myös tässä kohtaa pitemmän reitin hinnat olivat selvästi matalampia kuin lyhyemmän reitin hinnat.

Jos suojaustapana käyttäisi rosteriputkea tai umpinaista betonielementtiä, olisi sen asennuksen yksikköhinta sama kuin betonielementillä ilman kannen aiheuttamaa kustannusta.

TAULUKKO 8. Asennuksen yksikköhintoja

Asennus	Yksikköhinta	
Betonielementti	€/m	70
Pelkkä kansi	€/m	16
Anturamuotti	€/m	52

6.2 Energiamarkkinaviraston yksikköhinnat

Energiamarkkinavirasto (EMV) on asiantuntijavirasto, joka toimii työ- ja elinkeinoministeriön alaisena. EMV valvoo muun muassa sähkösiirtoverkon ja maakaasumarkkinoiden hinnoittelua ja edistää niiden kehitystä.

EMV on luonut Energiateollisuus Ry:n kanssa verkostosuosituksen "Verkostotöiden kustannusluettelo KA 2", joka on päivitetty vuonna 2010, jolloin päivitettiin muun muassa kaivuolosuhteita. On otettava huomioon, että julkaisun tiedot perustuvat massojen osalta viimeiseen yrityksistä saatavissa olleeseen 12 kuukauteen ja hinnoittelun osalta vuoteen 2010. Tilastot ovat laskettu painotetulla keskiarvolla.

Viimeisien vuosien EMV:n julkaisemien sähköjakelukomponenttien yksikköhinnat perustuvat tähän Energiateollisuus ry:n verkostosuosituksessa sekä Energiamarkkinaviraston Empower Oy:ltä tilaamaan sähköverkkokomponenttien yksikköhintojen määrittelyä koskevaan selvitykseen (17.11.2010).

EMV:n vuotuisessa julkaisuissa on määritelty muun muassa hinnat kaapelioiden kaivulle sijainnin perusteella. Taulukossa 9 on esitetty vuoden 2012 yksikköhinnat, joita on korjattu +4,4 % vuoden 2010 hintatasosta. Kaivusuoritteiden vaatavuustasot on määritelty tarkemmin verkostosuosituksessa KA-2. Kaapeleille, joiden jännitetaso on ≥ 110 kV, ei ole määritelty erikseen maanrakennuksen yksikköhintoja.

TAULUKKO 9. EMV:n yksikköhinnat kaapeliojan kaivutyölle vuonna 2012 (EMW 2012)

0,4 ja 20 kV maakaapelit (kaivu)	Yksikköhinta	
Haja-asutusalue, Helppo	€/m	9,36
Taajama, Normaali	€/m	21,36
Kaupunki, Vaikea	€/m	61,01
Ydinkeskusta, Erittäin vaikea	€/m	118,54

Kaapeliojan kaivuun kustannustietoon sisältyy työmaan valmistelu, kaivu ja täyttö, massan vaihto, asfaltin poistaminen ja asfaltointi, roudan sulatus, laatoitus, nurmetus ja sorastus.

EMV:n haja-asutusalue ja taajama luokitellaan samaksi kuin HSV:n yksikköhinnoissa esiintyvä esikaupunki, ja ydinkeskusta sekä kaupunki luokitellaan samaksi kuin HSV:n kantakaupunki. Kun verrataan EMV:n ja HSV:n toteutuneita yksikköhintoja, voidaan huomata niissä suuriakin eroja. Koska EMV:n tilastot pohjautuvat jakeluverkon (≤ 20 kV) tilastoihin, eivät ne pidä täysin paikkaansa suurjänniteverkossa ja ovat siksi pienempiä. 110 kV kaapelin kaivanto on ohjeellisesti 0,6 metriä syvempi kuin kj-kaapeleilla, mikä lisää kaivukustannuksia. Pienen eron tekee myös se, että HSV:n yksikköhinnat on laskettu puhtaalla keskiarvolla, ilman painotusta.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin maakaapelin asennusratkaisuja kaupunkialueella. Kaapelin mekaanisen suojaustavan merkitys on suuri, kun moni eri taho työskentelee samassa paikassa ja prioriteettina on hyvä toimintavarmuus. Jos kaapelia ei suojattaisi mitenkään mekaanisesti, olisi vikataajuus teoreettisten laskelmien mukaan noin 0,0095 vikaa kilometriä kohden ja tämän luvun perusteella HSV:n 65 kilometrin 110 kV verkossa tapahtuu noin 1 vika kahdessa vuodessa. Yhden vian korjaus voi maksaa verkko-yhtiölle useita kymmeniä tuhansia euroja. Enemmän kaapelivika aiheuttaa imagohaittaa ja heikentää verkon käyttövarmuutta. Tämän takia erityisesti jakelun kannalta tärkeillä 110 kV kaapeleilla on hyvä käyttää jonkinlaista mekaanista suojausta.

Varmimman suojauksen kaapelille antaa betonielementti, jota HSV on pääsääntöisesti käyttänyt viime vuosien menneissä rakennusprojekteissa. Betonista tehdyt elementit ovat kuitenkin muihin suojausratkaisuihin verrattuna kalliita ja jäykkiä, mutta takaavat varman suojauksen ulkopuolisilta vianaiheuttajilta. Tätä suojaustapaa kannattaa käyttää vain reitin niissä osissa, jotka ovat kriittisiä riskien kannalta. Pilottihankkeena toteutetun anturielementin hyötyjä ei ole näin lyhyellä aikavälillä vielä voitu todentaa, joten sen käyttö ei ole vielä suositeltavaa.

Uusina ratkaisuinä esiteltiin metallinen putki ja umpinainen betonielementti. Rosteri osoittautui parhaimmaksi materiaaliksi metalliputkelle, kun verrataan teräsputkesta valmistetun metalliputken aiheuttamia häviöitä. Teräsputkesta valmistettu suojaus vähentäisi kuitenkin maan pinnalla tuntuvia magneettikenttiä, joita tämän työn puitteissa käytiin yhdeltä reitiltä mittaamassa. Teräsputkea ei kuitenkaan kannatta käyttää suojaukseen siihen syntyvien pyörrevirtojen takia. Umpinainen betonielementti on käytännössä sama kuin HSV:n käyttämä betonielementti, mutta siinä ei ole erillistä kantta, mikä lisää kaapelin suojauksen varmuutta ja tekee asennuksesta hieman nopeampaa. Umpinaisen elementin käytöstä tuskin on erityistä lisähyötyä verrattuna kannelliseen malliin.

Tässä työssä tutkittiin sekä vierusmateriaalin että kosketussuojan vaikutusta kuormitettavuuteen. Vierusmateriaaleista käytetyin on hiekka, joka ei kuitenkaan mahdollista kaikissa tapauksissa parasta lämmön johtavuutta kaapelista ulospäin. Vaativimmissa tapauksissa, joissa kaapelin lämpeneminen on voimakkaampaa, on parempi käyttää kalliimpaa betonia. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös weak-mixiä, josta saa luotua

halutut ominaisuudet sisältävän seoksen. Weak-mix seoksen laatu voi toki joskus muodostua hieman erilaiseksi, jolloin päästään erilaiseen materiaaliominaisuuteen. Kuormitettavuuteen vaikuttava kosketussuojan maadoitustapa riippuu lähinnä reitin pituudesta. Pitkillä matkoilla ja suurivirtaisilla kaapeleilla kannattaa käyttää kalliimpaa cross-bonding -tekniikkaa ja lyhyemmällä joko single- tai solid bondingia, joiden ongelmia ovat maadoittamattoman pään jännite-ero tai maan kautta kulkeva virtapiiri, joka aiheuttaa häviöitä.

HSV:a kiinnostava kaapelin reaaliaikainen lämpötilanmittaus mahdollistaa esimerkiksi kaapelireitin kuormitettavuuden kannalta ongelmakohtien löytämisen. HSV sai tästä opinnäytetyöstä teoreettiset lähtötiedot kaapelin lämpötilanmittauksen toteuttamistavalle.

Opinnäytetyössä oli tarkoitus tutkia myös maanrakennustöiden yksikköhintoja. Saadut yksikköhinnat ovat hieman epätarkkoja eri keräystavoista johtuen eikä yhteistä trendiä eri kaapeliprojektien välillä kunnolla löytynyt kyseisellä tutkimusaikavälillä. Yksikköhintojen perusteella voitiin kuitenkin todeta lähtökohtaisen oletuksen olevan oikea, eli mitä kauemmaksi keskusta alueelta mennään, sitä edullisempia kaapeliprojektin maanrakennustyöt ovat. Tätä on kuitenkin melkein mahdoton hyödyntää, sillä sähkön tarvetta ei voida siirtää ruuhkaiselta keskusta-alueelta taajamiin. Yksikköhintoja voidaan kuitenkin yleisesti hyödyntää tehonsiirtoreittien suunnittelussa, kun optimoidaan teknistaloudellista kokonaisratkaisua. Jotta yksikköhintoja olisi järkevämpi verrata, kannattaisi HSV:n yhtenäistää ja tarkentaa yksikköhintojen kyselyaineistoa hankkeiden hankinta- ja toteutusvaiheissa.

Kaapeliprojektin kokonaistaloudellisuuteen vaikuttaa suuresti suojaustavan valinta. Kun suojaustavaksi valitaan betonielementti, on vikakeskeytyksen syyt rajattu rakenteellisiin vikoihin, jolloin riski pienentyy noin puolella. Tästä seuraa se, että viankorjauskustannuksetkin voivat jopa puolittua. Vahva mekaaninen suojaus voidaan luokitella kertainvestoinniksi, jolloin siihen kannattaa panostaa. Kokonaistaloudellisuutta mietittäessä on otettava huomioon myös kaapelireitillä syntyvät häviöt. Mitä vähemmän mekaaninen suojausratkaisu sisältää metallisia rakenteita sitä vähemmän sinne syntyy häviöitä aiheuttavia virtoja. Myös cross-bonding -tekniikka vähentää vaipassa syntyviä häviöitä, mutta on tekniikkana kalliimpaa. Yksikköhintojen perusteella pidempi yhteys on edullisempi rakentaa kuin lyhyt. Tästä voidaan päätellä, että kaapeliprojekteja olisi kannattavampaa tilata isommissa erissä, jolloin kokonaistaloudellisuus paranee. Tällöin myös resurssitarpeet vähenevät, koska esimerkiksi hankintakyselyitä ei tarvitse tehdä useita.

LÄHTEET

ABB. (ei pvm). XLPE Cable System Users Guide, rev.1. ABB.

APsensing. 2010. Haettu osoitteesta <http://www.apsensing.com/applications/power-cable/>

EMFs.info. (ei pvm). Haettu 18.12.2012 osoitteesta
<http://www.emfs.info/Sources+of+EMFs/Underground/>

EMW. 2012. Sähkönjakeluverkon komponenttien yksikköhinnat 2012.

Finergy, S. H. 2000. Sähkö ja magneettikentät. Haettu 19.12.2012 osoitteesta
<http://energia.fi/sites/default/files/sahko-%20ja%20magneettikentat.pdf>

General, C. 2005. Connection of earthing circuits in high voltage systems.

Helen. 2012. Helsingin Energia, sisäiset sivut. Haettu 18.3.2013 osoitteesta
www.helen.fi

HKR. 2008. Kaivutyöt ja tilapäiset liikennejärjestelyt pääkaupunkiseudulla. Helsinki.

HSV. Projektien valokuvia, T-asema. Helsinki.

Kaiser. 2012. D6 Vorlage PFISTERER IXOSIL_Cable Systems.

Laasonen Minna, Saarinen Katariina, Jarmo Sederlund, Sulamaa Pekka, Jyrki Uusitalo, Maarit Uusitalo, Pasi Yli-Saunamäki. 2011. Kantaverkon käsikirja. Fingrid.

Lakervi, E. P. 2009. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Otatieto.

Lucas, J. 2001. High voltage cables.

Malmi, P. 2011. Magneettikentän lähteitä. Haettu 18.12.2012 osoitteesta
<http://www.physics.utu.fi/projects/kurssit/UFYS1006/kalvot/BeamerLuku28.pdf>

Millar, J. 2005. Special backfill (weak-mix) trials from Suvilahti. Helsinki: Helsinki University of Technology.

Parviainen, M. 2009. Työohje. 110 kV kaapelireitti anturamuoteilla toteutettuna. Helsinki.

Prysmian Oy. (ei pvm). Projekteihin liittyviä materiaaleja.

Prysmian Oy. 2009. CFJX-123 -esite.

Prysmian Oy. 2012. Kaapelien kuormitettavuuden korjauskertoimet. Haettu 13.11.2012 osoitteesta http://www.prysmian.fi/energy/product_info/capacity_land.html

Conti, R., A. G. 2003. Technical Solutions To Reduce 50 Hz Magnetic Fields from Power Lines. Italy: IEEE.

R. Kivisaari, A. T. 2012. Prysmian Group. (M. Parviainen, Haastattelija) Espoo.

Rosevear, R. 2004. Optimization of Power Transmission Capability of Underground Cable Systems using Thermal Monitoring.

Sciencedirect.com. 2009. Haettu 11.4.2013 osoitteesta <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135409005326>

Sergeant P., K. S. 2011. Progress In Electromagnetics Research, Vol. 115, Electromagnetic losses in magnetic shields.

STUK. 2011. Säteily- ja ydinturvallisuuskatsauksia: Voimajohdot ympäristössämme. Helsinki.

Suomi, M. 2010. Kosketussuojan poikkipinnan vaikutus 60 - 400 kV suurjännitekaapelien kuormitettavuuteen. Insinööri työ.

Tyco Electronics Corporation, a. T. 2013. EPPA HIGH VOLTAGE CABLE SYSTEM LINK BOXES. Haettu 11.4.2013 osoitteesta <http://www.te.com/catalog/cinf/en/c/20100/2184>

Törrönen, A. 2013. Desing Engineer. Prysmian Oy.

Uponor, 2013. Uponor-Kaapelisuoja järjestelmä Tripla. Luettu 1.2.2013 osoitteesta www.uponor.fi

Virpiö, S. 2004. Rakennepiirustus. PO 01-34 388-602 Maakaapeli elementin kansi. Helsinki.

Virpiö, S. 2004. Rakennepiirustus. PO 01-35 388-603 Maakaapeli elementin asennus . Helsinki.

LIITTEET

Liite 1. Kaapelin asennusratkaisun vaikutus kuormitettavuuteen ja häviöihin

Kuormitettavuus & häviöt	Kaapelit muoviputkessa kolmiossa, ei täyteainetta	Kaapelit muoviputkessa kolmiossa, täyteaine 1.2Km/W
Kosketussuojan maadoitustapa	Cross bonded (balanced)	Cross bonded (balanced)
Virta [A]	1045	1086
Johtimen vaihtovirta resistanssi [Ohm/km]	0,0146	0,0146
Siirretty teho yhdessä virtapiirissä [MVA]	199	207
Vaipan häviökerroin	0,0290	0,0291
Johtimen häviöt vaihetta kohti [W/m]	15,92	17,18
Kosketussuojan häviöt vaihetta kohti [W/m]	0,46	0,50
Dielektriset häviöt eristeessä vaihetta kohti [W/m]	0,39	0,39
Kosketussuojaan indusoitunut jännite [V/km]	0,000	0,000

Kuormitettavuus & häviöt	Kaapelit kolmiossa yhdessä rautaputkessa, ei täyteainetta	Kaapelit kolmiossa yhdessä rosteriputkessa (316L)
Kosketussuojan maadoitustapa	Cross bonded (balanced)	Cross bonded (balanced)
Virta [A]	858	1005
Johtimen vaihtovirta resistanssi [Ohm/km]	0,0160	0,0151
Siirretty teho yhdessä virtapiirissä [MVA]	164	192
Vaipan häviökerroin	0,1020	0,1085
Johtimen häviöt vaihetta kohti [W/m]	11,75	15,23
Kosketussuojan häviöt vaihetta kohti [W/m]	6,55	1,65
Dielektriset häviöt eristeessä vaihetta kohti [W/m]	0,39	0,39
Kosketussuojaan indusoitunut jännite [V/km]	0,000	0,000