LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Diplomityö

Joni-Aleksi Oinonen

Maakaapeloinnin asennussyvyyden vaikutukset sähköturvallisuuteen ja investointien kustannustehokkuuteen

Työn tarkastajat: Apul. prof. Jukka Lassila

TkT Juha Haakana

8.12.2022

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Joni-Aleksi Oinonen

Maakaapeloinnin asennussyvyyden vaikutukset sähköturvallisuuteen ja investointien kustannustehokkuuteen

Diplomityö

2022

55 sivua, 9 kuvaa, 12 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Apul. prof Jukka Lassila
TkT Juha Haakana

Hakusanat: asennussyvyys, maakaapeli, maakaapelointi, elinkaarikustannukset, sähköturvallisuus

Suomessa asennettavien maakaapeleiden asennussyvyys on 0,7 m kun taas Ruotsissa samat kaapelit voi asentaa 0,55 m syvyyteen. Maakaapelien asennussyvyyden muutos voi olla yksi tapa pienentää maakaapeloinnin kustannuksia Suomessa, mikäli asennussyvyyden muutos ei heikennä maakaapelin sähköturvallisuutta.

Työn tarkoituksena oli selvittää maakaapelin asennussyvyyden osuus maakaapelointitöiden kustannuksista ja tarkastella onnettomuustilastojen valossa sitä, että onko maakaapeleiden sähköturvallisuus Ruotsissa heikompi matalamman asennussyvyyden vuoksi.

Maakaapelien asennussyvyyden osuutta maakaapelointitöiden kustannuksista ei pystytty määrittämään julkisesti saatavan tiedon pohjalta. Eroa maiden sähkötapaturmissa ei pystytty määrittämään julkisen tiedon pohjalta muuta kuin lukumäärissä, jotka olivat lähellä toisiaan.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Electrical Engineering

Joni-Aleksi Oinonen

Effects of the installation depth of underground cables on electrical safety and on the cost-efficiency of investments

Master's thesis

2022

55 pages, 9 figures, 12 tables and 1 appendice

Examiners: Assoc. Prof. Jukka Lassila
D.Sc. (Tech.) Juha Haakana.

Keywords: installation depth, ground cables, ground cabling, underground cable, land cable, life cycle costs, electrical safety

Installation depth for underground cables in Finland is 0,7 m, whereas in Sweden the required depth for the same cables is 0,55 m. The change in installation depth of underground cables could be a way to reduce the costs of underground cable installation in Finland if the change doesn't worsen the electrical safety of underground cables.

The goal of the study was to figure out the share of the costs of underground cabling works that stem from the cable installation depth, and to peruse accident statistics to find out if the electrical safety of underground cables is worse in Sweden due to their lower installation depth.

The share of the total costs of installation depth from underground cabling works could not be determined via freely available sources. The difference in electrical safety of the two countries could not be determined via freely available sources in other than in the number of electrical mishaps, numbers of which were close to each other.

ALKUSANAT

Kiitos kaikille asianomaisille kärsivällisyydestä tähän diplomityöhön liittyen koko sen prosessin ajan.

Kiitokset perheelleni ja avopuolisolleni tuesta ja kirittämisestä työn aikana. Kiitos kaikille opiskelujeni aikana mukaan tarttuneille kavereille ja tuttavuuksille. Opintoni on nyt viimein saatu päätökseen ja kivenlohkare on vihdoin vieritetty rinteen huipulle.

Espoossa 8.12.2022

Joni-Aleksi Oinonen

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

a	keskeytystehon haitta-arvo
b	keskeytysenergian haitta-arvo
E	toimittamatta jäänyt energia
f	vikataajuus
h	korkeus
K	kustannukset
ΔKHI	kuluttajahintaindeksin muutos
KHI	kuluttajahintaindeksin (1995=100) huhti-syyskuun indeksipistelukujen keskiarvo, työssä käytetty (2005=100) indeksiä
l	pituus
ΔP	keskimääräinen keskeytysteho
p	käytettävä korkotaso
r	tehon vuotuinen muutos
T	suunnittelujakson kesto vuosissa
t	tarkasteluajan pituus
U	keskimääräinen vuotuinen keskeytysaika
V	tilavuus
w	leveys

Kreikkalaiset

κ	kapitalisointikerroin
ψ	kapitalisoinnin apukerroin

Alaindeksit

häv	häviö
h	tunti
i	verkkokomponentti
inv	investointi

j	sähkönkäyttäjä
kaivu	kaivuu
kesk	keskeytys
kok	kokonais
korjaus	viankorjaus
korjausoja	viankorjaukseen kaivettu oja
kun	kunnossapito
oja	kaapelioja
t	vuosi

Lyhenteet

AXMK	PEX-eristeinen, alumiinijohtiminen maakaapeli, PEN-johdin
AXCMK	PEX-eristeinen, alumiinijohtiminen maakaapeli, konsentrinen PEN-johdin
AMCMK	PVC-eristeinen, alumiinijohtiminen maakaapeli, konsentrinen kuparisuojajohdin
HDPE	High Density Polyethylene, suuritiheyksinen polyeteeni
IEC	International Electrotechnical Comission, kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
MCMK	PVC-eristeinen, kuparijohtiminen maakaapeli, konsentrinen PEN-johdin
PEN	Yhdistetty suojamaadoitus- sekä nollajohdin
PE	Polyeteeni, muovi
PEX	Ristisilloitettu polyeteeni, muovi
PVC	Polyvinyylikloridi, muovi
Tukes	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, Suomen lupa- ja valvontaviranomainen
TVK	Tapaturmavakuutuskeskus
SFS	Suomen Standardisoimisliitto SFS ry (Finlands Standardiseringförbund), suomalainen standardisoinnin keskusjärjestö.
SS	Svensk standard, ruotsalainen standardisoinnin keskusjärjestö

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto 9

1.1 Työn tavoitteet 9

2 Verkkoratkaisut ja verkon rakentamistekniikat Suomessa ja Ruotsissa 11

2.1 Sähköverkkojen rakenne 11

2.2 Sähköverkot Suomessa ja Ruotsissa 12

2.3 Pienjänniteverkko 13

2.3.1 Muuntamo 14

2.3.2 Jakokaappi ja varokkeet 15

2.3.3 Verkon kuormat 16

3 Maakaapelien ominaisuudet, asentaminen, vaatimukset ja sähköturvallisuus 17

3.1 Maakaapelin ominaisuudet ja rakenne 17

3.2 Maakaapeleiden asennusolosuhteet Suomessa ja Ruotsissa 19

3.3 Kaapeleiden asentaminen 20

3.4 Pienjännitemaakaapeliasennuksen vaatimukset Suomessa 22

3.5 Pienjännitemaakaapeliasennukset Ruotsissa ja näiden erot Suomeen 25

3.6 Sähkötapaturmat Suomessa ja Ruotsissa 26

3.7 Yhteenveto maakaapeleiden vaatimuksista ja turvallisuudesta 30

4 Maakaapeliasennuksen elinkaarikustannuslaskenta 31

4.1 Investointikustannukset 31
4.2 Häviökustannukset 33
4.3 Keskeytyskustannukset 33
4.4 Kunnossapitokustannukset 37
4.5 Kokonaiskustannukset 37
5 Maakaapeliojan kustannukset 39
5.1 Kaivuutyön hinnoittelu siirretyn maa-aineksen kautta 39
5.2 Kaapelin pituuden ja vikataajuuden vaikutus elinkaarikustannuksiin 43
6 Tapaustarkastelut 46
6.1 Maakaapelit haja-asutusalueella (Tapaus 1) 46
6.2 Maakaapelit asemakaava-alueella (Tapaus 2) 48
6.3 Tapaustarkastelun tulokset 50
7 Yhteenveto 51
Lähteet 53
Liite 1

1 JOHDANTO

Suomi on pitkien etäisyyksien metsäinen maa. Jakeluverkkoyhtiöt hoitivat tehtävänsä pitkään pääosin alkuinvestoinniltaan suhteellisen halpojen ilmajohtojen avulla, kunnes 2011 iskeneet Tapani- ja Hannu-myrskyt saivat Eduskunnan uudistamaan sähkömarkkinalain 2013 (588/2013), jonka toimitusvarmuustavoitteissa kiristettiin asemakaava-alueille ja ei-asemakaava-alueille sallittuja myrskystä johtuvia sähkönjakelun keskeytyksiä korkeintaan 6 ja 36 tuntiin. Tämän sähkömarkkinalakiin kirjatun jakeluverkon laatuvaatimuksen takia osa jakeluverkkoyhtiöistä alkoi viemään myrskylle alttiita ilmajohtoverkkojaan maan alle, johtaen ilmajohtoverkon asennusta huomattavasti kalliimpien maakaapelointien suureen kasvuun ja osittain myös vielä teknistä käyttöikää sisältävien ilmajohtojen muuttamiseen maakaapeliksi. Näiden edelleen jatkuvien toimitusvarmuusinvestointien vuoksi maakaapeloinnin määrä Suomessa on lisääntynyt rutkasti, ja siksi onkin luontevaa pohtia keinoja tuoda uuden maakaapelin asentamisen kustannusta lähemmäksi ilmajohtoverkon rakentamiskustannuksia. Yksi näistä keinoista on tarkastella maakaapelin asennussyvyyttä – onko maakaapelin asentaminen 0,7 m tarpeen, vai voisiko kaapelit asentaa 0,55 m syvyyteen.

Tässä työssä tarkastellaan maakaapelin asennussyvyyden vaikutusta kaapelin elinkaarikustannuksiin helpoissa asennusssolosuhteissa sekä matalamman asennussyvyyden vaikutuksia maakaapelin turvallisuuteen. Työssä on keskitytty kaapeleiden perinteisimpään asennustapaan, eli kaivutekniikkaan, jossa kaapelia varten kaivetaan kaivinkoneella kaapelioja, jonka pohjalle kaapeli sijoitetaan määrättyyn syvyyteen standardeissa määritellyin suojauksin.

1.1 Työn tavoitteet

Diplomityön ensisijaisena tavoitteena on tuottaa tarkastelu, jolla pystytään arvioimaan pienjänniteverkon maakaapelin asennussyvyyden merkitys maakaapelin asennuskustannuksiin ja sähköturvallisuuteen. Työn toinen tarkoitus on arvioida sitä, voitaisiinko Suomessa siirtyä matalampaan asennussyvyyteen, esimerkiksi Ruotsissa käytettyyn 0,55 m nykyisestä Suomen 0,7 m asennussyvyydestä.

Työssä vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Miten maakaapelin asennussyvyys vaikuttaa maakaapelin asennuskustannuksiin?
- Löytyykö kirjallisuudesta kirjallisuudesta tukea sille, että matalampi asennussyvyys vaikuttaisi kaapelin vaurioitumisriskiin?
- Miten Suomen ja Ruotsin turvallisuusvaatimukset maakaapeloinnissa eroavat toisistaan?
- Näkyykö Suomen ja Ruotsin asennussyvyyden ero maiden sähkötapaturmatilastoissa?

Diplomityö rajattiin maan alle asennettavaan pienjänniteverkkoon. Keski- ja suurjänniteverkon kaapeloinnit jätetään työn ulkopuolelle pienemmän esiintyvyytensä takia. Nykyverkossa on jo käytössä kosketussuojattuja pienjännitekaapeleita, jotka voidaan nykystandardien valossa asentaa ilman erityistä mekaanista suojausta lähemmäs maan pintaa, joten on luontevaa tarkastella myös kosketukselta suojaamattomien kaapeleiden turvallisuutta samassa ympäristössä. Diplomityön keskeisimmät tutkimusmenetelmät ovat työn teoriaosan kvalitatiivinen kirjallisuustutkimus ja teoriaosan perusteella luodut tapausesimerkit kahdesta pienjännitekaapelikohteesta.

Työn ensimmäisessä luvussa käydään läpi sähköverkkojen rakenne ja Ruotsin sekä Suomen yhteneväisyydet. Kolmannessa luvussa käsitellään maakaapeleita ja sähköturvallisuutta maakaapeleihin liittyen. Neljännessä luvussa käydään läpi elinkaarilaskenta maakaapeliasennuksiin liittyen. Viidennessä luvussa tarkastellaan maakaapeliasennuksia ja niissä siirrettävää maamassaa sekä perustellaan miksi maakaapelin tyypillä tai pituuden muutoksella ei ole väliä elinkaarilaskennassa. Kuudennessa luvussa suoritetaan tapaustarkastelu kahdelle kohteelle ja luodaan arvio matalamman asennussyvyyden kustannuksista sekä niiden vaikutuksista asennuksen elinkaarikustannuksiin. Seitsemännessä luvussa on työn yhteenveto.

2 VERKKORATKAISUT JA VERKON RAKENTAMISTEKNIIKAT SUOMESSA JA RUOTSISSA

Tässä luvussa käydään läpi Suomen ja Ruotsin sähköverkkojen rakennetta ja maiden sähköverkon maakaapelointiastetta.

2.1 Sähköverkkojen rakenne

Suomen sähköjärjestelmä koostuu voimalaitoksista, kantaverkosta, suurjännitteisistä jakeluverkoista, jakeluverkoista sekä sähkön kuluttajista. [Fingrid 2020] Pienimpiä, enintään 1 kV jännitteitä kutsutaan pienjännitteeksi, suurempia jännitteitä keskijännitteeksi (1–36 kV) tai suurjännitteeksi (110–400 kV). [Energiateollisuus 2016] Ruotsin sähköjärjestelmä muodostuu samanlaisista tekijöistä kuin Suomen sähköjärjestelmä pienin poikkeuksin, kuten käytetyssä keskijännitteen ylärajassa, joka on Suomen 36 kV sijaan 50 kV.

2.1.1 Kanta- ja jakeluverkko

Suomessa ja Ruotsissa toimivia verkkopalveluita tarjoavia yhtiöitä kutsutaan yhtiön hallitseman verkon perusteella kanta-, alue- tai jakeluverkonhaltijoiksi tai -verkkoyhtiöiksi. Jakeluverkkotoiminta on sekä Ruotsissa että Suomessa luvanvaraista monopolitoimintaa. Suomessa lupia hallinnoi ja jakeluverkkoyhtiöitä valvoo Energiavirasto, Ruotsissa vastaava virasto on Energimarknadinspektionen. Sähköverkkoluvan saaneita kanta- ja alueverkonhaltijoita oli Suomessa yhdeksän kappaletta vuonna 2019 [Energiavirasto 2021a], eikä niillä ole erityistä maantieteellistä vastuualuetta. Ruotsissa alueverkkoyhtiöitä on 21 [Energimarknadinspektionen 2021a]. Kantaverkko Suomessa on Fingrid Oyj:n ylläpitämä Suomen valtakunnalliseen sähkönsiirtoon käytetty suurjänniteverkko, Ruotsin kantaverkkoa hallinnoi ja ylläpitää Svenska Kraftnät.

Jakeluverkkoyhtiöitä Suomessa on 77 [Energiavirasto 2021a], Ruotsissa 177 [Energimarknadsinspektionen 2021b]. Jakeluverkonhaltijan verkkolupaan liittyy maantieteellinen vastuualue, jonka sisällä verkonhaltijalla on yksinoikeus rakentaa jakeluverkkoa. Jakeluverkkoyhtiöllä voi olla keski- ja pienjännitteisten jakeluverkkojen lisäksi myös 110 kV verkkoa. [Elovaara & Haarla 2011a] Jakeluverkot toimivat 0,4–110 kV jännitetasolla ja kotitaloudet ovat

liittyneinä jakeluverkkoihin. Teollisuus, kauppa, palvelut ja muu kulutus kuten maatalous liittyvät jakelu-, alue- tai kantaverkkoon tarpeidensa mukaan. [Elovaara & Haarla 2011a].

2.2 Sähköverkot Suomessa ja Ruotsissa

Suomi ja Ruotsi ovat osa yhteispohjoismaista sähköjärjestelmää yhdessä Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan järjestelmien kanssa. Suomella on myös tasasähköyhteydet Venäjän ja Viron kanssa, joiden kautta pohjoismainen järjestelmä on yhdistetty Venäjän ja Baltian voimajärjestelmiin. [Fingrid 2020]

Taulukkoon 2.1 on koottu vuoden 2019 osalta Suomen tiedot Energiaviraston julkaiseman Tilastoja sähköverkoista -julkaisusta [Energiavirasto 2021b]. Ruotsin tiedot vuoden 2019 osalta on haettu Energimarknadinspektionenin julkaisuista [Energimarknadinspektionen 2020], jotka Energimarknadinspektionen on koonnut sille jakelu- ja alueverkkoyhtiöiden ilmoittamien tietojen pohjalta.

Taulukko 2.1. Suomen ja Ruotsin sähköverkko jaettuna jännitetasoihin, kunkin jännitetason johtopituus, osuus kokonaisjohtopituudesta sekä jännitetason maakaapelointiaste vuonna 2019. [Energiavirasto 2021b] [Energimarknadinspektionen 2020]

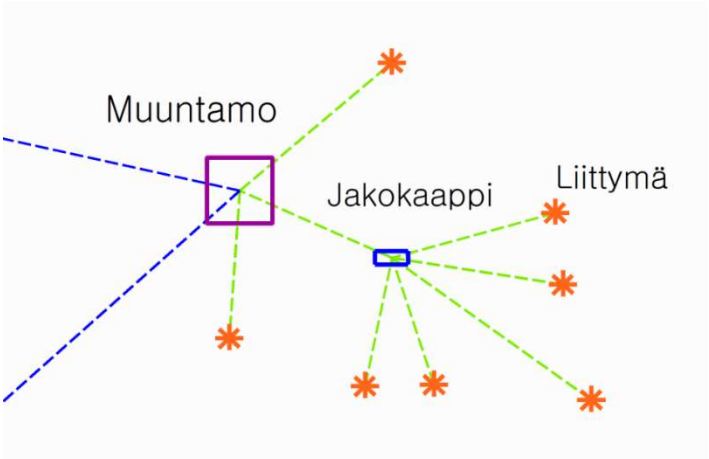
Suomi	**Jännitetaso [kV]**	**220 - 400**	**110**	**1-70**	**0,4 - 1**
	Johtopituus [km]	7000	16000	153000	251000
	Osuus kokonaisjohtopituudesta	1,60 %	3,90 %	35,80 %	58,80 %
	Maakaapeloitu osuus johtopituudesta	4,00 %	2,10 %	35,70 %	51,40 %
Ruotsi	**Jännitetaso [kV]**	**> 130**	**70 - 130**	**1-70**	**0,4 - 1**
	Johtopituus [km]	16 000	20 000	220 000	326 000
	Osuus kokonaisjohtopituudesta	2,70 %	3,40 %	37,80 %	56,10 %
	Maakaapeloitu osuus johtopituudesta	0,50 %	2,20 %	63,10 %	83,50 %

Suomen ja Ruotsin maakaapelointiasteet vuonna 2019 vastasivat toisiaan suurjännitteisen jakeluverkon osalta, kummankin maan suurjännitteinen sähkönsiirto tapahtui pääosin ilmajohtoverkoilla. Taulukon 2.1 perusteella keski- ja pienjänniteverkkojen maakaapelointiasteet poikkesivat kuitenkin toisistaan huomattavasti; Ruotsissa keskijännitekaapelin osuus on huomattavasti suurempi kuin Suomessa, ja maa oli vuonna 2019 huomattavasti pidemmällä myös pienjänniteverkkojen maakaapeloinnissa.

Energiaviraston julkaisun Tilastoja sähköverkoista -mukaan [Energiavirasto 2021b] 58,8 % Suomen verkkoyhtiöiden johtopituudesta on pienjänniteverkkoa, ja Sähköverkkoyhtiöiden eriytetyt tilinpäätöstiedot ja taloudelliset tunnusluvut -dokumentin mukaan [Energiavirasto 2021b] vuonna 2019 yli 80 % verkkoyhtiöiden investoinneista olivat korvausinvestointeja. Korvausinvestointi tarkoittaa sähköverkon kehittämistoimenpiteitä, joiden syynä voi olla verkonosan teknisen iän loppuminen, verkonosan sähköteknisen kapasiteetin lisäystarve tai sähköturvallisuuteen liittyvät syyt [Energiamarkkinavirasto 2011]. Loput investoinneista olivat laajennusinvestointeja, eli kokonaan uuden sähköverkonosan (esimerkiksi johdon tai muuntamon) rakentamista [Energiamarkkinavirasto 2011]. Suurin osa pienjänniteverkoista oli vuonna 2019 maakaapeloitu ja trendi on vuosien 2016–2019 osalta ollut kasvava, eli maakaapelin osuus pienjänniteverkoista on kasvanut joka vuosi. Toimitusvarmuusinvestointien myötä maakaapelin osuus pienjänniteverkoista tulee todennäköisesti kasvamaan jatkossakin.

2.3 Pienjänniteverkko

Pienjänniteverkko on paikallisen jakeluverkkoyhtiön omistuksessa olevaa verkkoa, jolla korkeintaan 1 kV vaihtojännitetasolla tai 1,5 kV tasajännitetasolla olevaa jännitettä siirretään jakeluverkkoyhtiön sähköverkon kautta sähkön kuluttajille. Pienjänniteverkko on saa syötön suurempijännitteisestä verkosta muuntamossa olevan muuntajan kautta. Maakaapeliverkkoa on havainnollistettu kuvassa 2.1.



Kuva 2.1 Pienjänniteverkon komponentit TrimbleNIS verkkotietojärjestelmässä. Keskijännitekaapeli (sininen katkoviiva) syöttää muuntamoa, muuntamo syöttää jakokaappia pienjännitekaapelilla (vaaleanvihreä katkoviiva) ja jakokaappi tai muuntamo syöttävät sähköliittymiä eli verkon kuormia (oranssi tähti katkoviivan päässä).

2.3.1 Muuntamo

Pienjänniteverkkoja käytetään tavallisesti säteittäisinä, eli verkossa on syöttöpisteenä 20/0,4 kV jakelumuuntamo. Pienjänniteverkkoa syöttävällä jakelumuuntamolla muunnetaan suurempi jännite yleensä 0,4 kV tasolle. Pienjänniteverkon vikavirta- ja ylikuormitussuojaus hoidetaan jakelumuuntamolla; Suomessa jokainen lähtö varustetaan sulakkeilla. [Lakervi & Partanen 2008, 157] Jakelumuuntamo koostuu keskijännitekiskostosta, yhdestä tai useammasta jakelumuuntajasta, pienjännitelähdöstä sekä mahdollisesta apujännitejärjestelmästä. Esimerkki puistomuuntamosta kuvassa 2.2.

Kuva 2.2 Kahden muuntajakoneen puistomuuntamo asemakaava-alueella Uudellamaalla.

Maaseudun ilmajohtoverkossa käytetään pylväsmuuntamoita, joissa keskijännitejohto kytkeytyy yleensä erottimen kautta muuntajan ensiöliittimiin. Pylväsmuuntamot soveltuvat pienille, enintään 315 kVA muuntajille. Taajamaverkoissa jakelumuuntamo toimii usein keskijännitekaapelirenkaan osana, ja taajamissa puisto- ja kellarimuuntamot ovat yleisiä, suuruusluokalta lähempänä 1000 kVA. [Lakervi & Partanen 2008, 158]

Maakaapeliverkoissa käytetään myös pieniä, säteittäisjohdolla syötettäviä niin sanottuja satelliittimuuntamoita. Nämä muuntamot ovat rakenteeltaan melko yksinkertaisia ja sisältävät tyypillisesti 300 kVA luokkaa olevan muuntajan. Tällainen pienikokoinen muuntamo sopii käytettäväksi tilanteissa, joissa taajaan rakennetun alueen kuormitus kasvaa. Samantapainen ratkaisu on yleistymässä myös maaseudun maakaapelialueilla Ruotsissa. [Lakervi & Partanen 2008, 158]

2.3.2 Jakokaappi ja varokkeet

Ilmajohtoverkkoa voidaan haarauttaa pylväällä, mutta maakaapelin haarautumiseen tarvitaan jakokaappi. Jakokaappi tarvitaan maakaapelin päähän myös silloin, jos muuntamossa ei ole vapaita pienjännitelähtöjä tai reitti muuntamolta johtohaaran päähän ylittää standardissa SFS 6000-8-801 TN-maadoitusjärjestelmälle sallitun 200 m matkan. Tällöin johtohaaran päässä olevan sähköliittymän ja muuntamon väliin täytyy asentaa jakokaappi siten että jakokaapilta johtohaaran päähän jäävä matka on alle 200 m, jotta standardissa määritetty maadoitusten esiintyvyys toteutuu. Esimerkki jakokaapista kuvassa 2.3.

Kuva 2.3 Metallinen jakokaappi

Pienjännitejohdon suojauksen tulee olla teknillisesti ja taloudellisesti mitoitettu suojattavalle verkolle. Tavallisin pienjännitejakeluverkon vikavirtasuojalaite on varoke. Se sijoitetaan jakelumuuntamolle kunkin lähdön kaikkiin vaihejohtimiin. Sulake mitoitetaan siten, että se kestää kuormitusvirran mutta toimii riittävän nopeasti myös verkoston loppupäässä tapahtuvasta yksivaiheisesta oikosulusta [Lakervi & Partanen 2008]. Mikäli näitä vaatimuksia ei voida täyttää, joudutaan käyttämään kuormituksen perusteella määriteltyä suurempaa johdinpoikkipintaa tai asettamaan johdolle välivarokkeita [Lakervi & Partanen 2008, 163] selektiivisyyden toteuttamiseksi. Välivarokkeita ei kuitenkaan maakaapeliverkossa ole mahdollista lisätä suoraan kaapelille, vaan niiden lisäämiseksi verkkoon asennetaan maan päälle jakokaappi.

2.3.3 Verkon kuormat

Pienjänniteverkossa kuormitukset ovat pienjännitekulutuskojeita, ja verkon tähtipiste on yleisesti maadoitettu. Eri asutusalueiden pienjänniteverkkojen kulutuksissa on suurta vaihtelua. Tämän vuoksi taloudellisimmat jakeluverkot ovat eri alueilla erilaisia; taajamassa sovellettava pienjännitekaapeli ei välttämättä ole taloudellinen vaihtoehto korvaamaan haja-asutusalueen pienitehoisemmasta muuntajasta asiakkaalle lähtevää riippukierrejohtoa. Saman jänniteportaan verkot ovat sekä tehtäviltään että toteutuksiltaan siinä määrin erilaisia, että myös niiden rakenteiden ja suojausten on oltava keskenään erilaisia toimiakseen oikein. Eroja aiheutuu muun muassa muuntopiirien kokojen eroista, erilaisista selektiivisyyden toteuttamismahdollisuuksista sekä oikosulkuvirtojen ja käyttöolosuhteiden erilaisuuksista. [Lakervi & Partanen 2008, 159]

Pienjänniteverkon suojaukselle on asetettu tiukat vaatimukset. Tästä huolimatta, tapaturmatilastojen valossa pienjänniteverkko on yleisin vaarallisten kosketusjännitteiden aiheuttaja ja Suomessa 60 % kuolemaan johtaneista sähköiskutapaturmista on aiheutunut pienjännitteellä. [Lakervi & Partanen 2008, 158] Ruotsin tapaturmaluvut ovat samankaltaiset, ja näitä käyn läpi tarkemmin myöhemmissä luvuissa.

Jakeluverkkoyhtiön vastuu kaapelista päättyy tavanomaisesti asiakkaan tontin rajalle, ja tästä eteenpäin vastuu kaapelin ylläpidosta ja mahdollisesta uusimisesta on asiakkaalla. Maalämpöön siirtyminen ja sähköautojen latauslaitteiston asentaminen ovat yleisiä tapauksia, jolloin asiakas joutuu korottamaan sähköliittymäänsä ja samanaikaisesti uusimaan tontilla sijaitsemaan pienjännitekaapeliaan. Useimmiten kaapelireitin yläpuolelle on vuosien saatossa saatettu rakentaa esimerkiksi parkkipaikka tai istutuksia, tarkoittaen sitä, että kaapelia uusittaessa täytyy kaapelin reitti suunnitella uudestaan. Ruotsin jakeluverkkoyhtiöt toimittavat liittymiskaapelin asiakkaan tontilleen asentamaan putkeen, jolloin riski kaapelin väärästä asennuksesta pienenee, mutta Suomessa liittymispiste määrittää kuinka pitkälle jakeluverkkoyhtiö, tai sen urakoitsija, kaapelin asentaa ja sen mahdollisista korjauksista vastaa.

3 MAAKAAPELIEN OMINAISUUDET, ASENTAMINEN, VAATIMUKSET JA SÄHKÖTURVALLISUUS

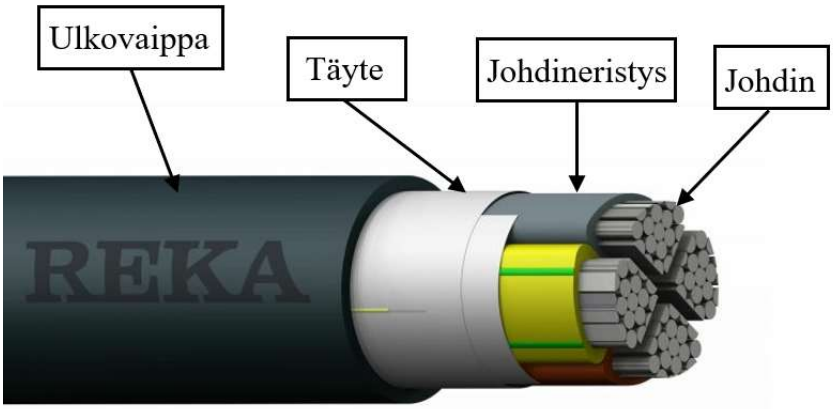
Tässä luvussa käydään läpi maakaapeleiden rakenne, tuodaan esille maakaapeleiden ja ilmajohtojen eroja, vertaillaan Suomen ja Ruotsin maaperiä maakaapelien asennuksen kannalta sekä käydään läpi voimassa olevia standardeja maakaapeleihin ja niiden asennukseen liittyen. Luvussa tehdään myös katsaus Ruotsissa ja Suomessa tapahtuneisiin sähkötapaturmiin ja pyritään selvittämään maakaapeleiden asennussyvyyden vaikutus niihin.

3.1 Maakaapelin ominaisuudet ja rakenne

Maakaapelit ovat maan pinnan alapuolelle asennettavia sähkön siirtoon tarkoitettuja teollisesti tuotettuja kaapeleita. Maan alle sijoitetut kaapelit pitää suojata maan pinnalta tulevalta rasitukselta, mutta koska kaapelit sijaitsevat maan alla ovat ne paljon paremmin suojassa eri luonnonilmiöiltä kuin ilmassa olevat johdot. Kaapelit eivät oikein asennettuna haittaa ympäristöään eikä maastossa kulkiessa ihminen edes havaitse kulkevansa kaapeleiden yläpuolella. Maallikot joutuvat oikein asennettujen maakaapeleiden kanssa tekemisiin silloin, kun he suorittavat laajoja maan muokkauksia tai kun puutarhassa istutetaan syvälle kaivamista vaativia puita tai pensaita. Kaivajaa oikein asennetusta kaapelista varoittaa asennuskuoppaan kaapelin yläpuolelle asennettu keltainen varoitusmuovi, joka paitsi suojaa kaapelia ulkoiselta voimalta myös varoittaa kaivajaa kaivamasta syvemmälle sillä hän on tällöin vaarassa kaivaa maakaapeliin. Maakaapeli voi olla myös asennettuna keltaiseen suojaputkeen.

Maakaapelia ei voi ylikuormittaa yhtä kauan kuin ilmajohtoa. Maakaapeli ei jäähdy yhtä nopeasti kuin ilmajohto sillä siinä missä lämmennyt ilma liikkuu ilmajohdon ympäristöstä pois ja viileämpää ilmaa virtaa ilmajohdon ympärille, lämmennyt maa jää maakaapelin ympärille. Maakaapeli on myös ilmajohtoa hankalampi asentaa, sillä siinä missä ilmajohdolle riittää useita pistemäisiä reikiä maahan pylväitä varten, täytyy kaapelin asennusta varten useimmissa tapauksissa avata koko kamara. Puutteellisesti merkityt kaapelit ovat ilmajohtoja paljon hankalampia paikantaa, sekä kaapelivikojen havainnointi ja korjaus ovat ilmajohtoa hankalampia sillä kaapelin korjaus vaatii yleensä kaapelin kaivamisen esiin.

Maakaapeli koostuu yhdestä tai useammasta johtimesta, johdinsuojasta, johdineristyksestä, hohtosuojasta, kosketussuojasta ja kaapelin ulkoisista suojakerroksista, kuten vaipasta, armeerauksesta ja korroosiosuojasta. Johdin-, hohto- ja kosketussuojia käytetään keski- ja suurjännitekaapeleissa. [Elovaara & Haarla 2011b, 307] Johdin-, hohto- tai kosketussuojia ei työssä käsiteltävien kaapeleiden rakenteissa ole.



Kuva 3.1 Alumiinivoimakaapelin perusrakenne sektorinmuotoisilla alumiiniköysillä. Kuvassa REKA-kaapelin AXMK 4x120 S-kaapelin datalehdestä otettu kuva (muokattu). [REKA-kaapeli 2022]

Kaapelien johtimet ovat yleensä kuparia tai alumiinia, muita metalleja tai seoksia voidaan käyttää erikoistapauksissa esimerkiksi vetolujuuden lisäämiseksi. Alumiini on kuparia kevyempää ja edullisempaa, mutta alumiinilla on kuparia suurempi resistiivisyys, minkä vuoksi alumiinikaapeleiden poikkipinta-alan on oltava yleensä noin puolitoistakertainen kuparikaapelia vastaavan virranjohtokyvyn saavuttamiseksi. Kaapelijohtimien pinta-alat ja tasavirtavastukset on standardoitu kansainväliseen standardiin IEC 60228. Kaapeleiden valmistuksessa valmistettavan kaapelin pinta-alaa suurempi painoarvo on spesifioidulla resistanssirajalla. Pinta-alan kasvaessa kaapelin virranjohtokyky eli kuormitettavuus kasvaa, mutta myös kaapelin jäähtymisominaisuuksia on tällöin parannettava. Johtimet koostuvat sitä useammasta ja ohuemmasta johdinlangasta mitä suurempaa liikuteltavuutta ja taipuisuutta kaapeli vaatii.

Johdineristys on johtimen tai johdinsuojan päältä mahdolliseen hohtosuojaan saakka ulottuva eristys. Johdineristys antaa kaapelille riittävän jännitekestoisuuden, ja sen on myös siirrettävä johtimessa ja itsessään syntyvä häviölämpö riittävän tehokkaasti pois kaapelista. Johdineristyksiä ovat esimerkiksi öljykyllästeinen paperi tai erilaiset muovit kuten polyetyleeni.

Kaapelien ulkoiset suojakerrokset vaihtelevat kaapelityypin ja käyttötarkoituksen mukaan. Välivaippoja käytetään yhteen kerrattujen johtimien mekaanisena suojana ja kaapelia pyöristävänä väliaineena. Ulkovaipat voivat olla muovia, kumia tai metallia, kuten lyijyä tai alumiinia. Pienjännitekaapeleissa alumiinivaippa voi toimia samanaikaisesti nollajohtimena, niin sanottuna konsentrisena nollajohtimena. Sopivia muoveja kaapelien vaippamateriaaleiksi ovat polyeteenit, erityisesti suuritiheyksinen polyeteeni HDPE. Pienjännitteellä käytetään erityisesti PVC-vaippoja. Metallivaipat, varsinkin alumiinivaipat tarvitsevat hyvän korroosiosuojan. Korroosiosuojana voi toimia bitumi sellaisenaan, tai bitumilla kyllästetyt paperi-, muovi-, tai tekstiilinauhat. Myös muovivaippa soveltuu korroosiosuojaksi. [Elovaara & Haarla 2011b, 312] Armeerausta, eli kaapelin päällystämistä teräsnauhoilla tai -langoilla, ei nykyisin käytetä lainkaan maahan asennettavissa voimakaapeleissa, sillä alumiinivaippa antaa kaapelille riittävän lujuuden maahan upottamista varten. [Elovaara & Haarla 2011b, 312] Armeerausta käytetäänkin pääosin meri- ja kaivoskaapeleissa sekä harvemmin maahan asennettavissa asennusjohdoissa suojaamaan niitä esimerkiksi jyrsijöiltä.

3.2 Maakaapeleiden asennusolosuhteet Suomessa ja Ruotsissa

Suomi ja Ruotsi ovat geologisesti molemmat osa samaa Fennoskandian kilpeä, eli maiden peruskalliot ovat samaa kiviainesta [Lehtinen, M. et al, 1998]. Maiden maanpeitteet ovat myös muodostuneet samoin, jäätikön vetäytyessä ja jättäessä kalliosta tai maalajeista jauhamiaan maa-aineksia jälkeensä, ja yleisin maalaji molemmissa maissa on moreeni. Yleisin maatyyppi ja maan muodostumistapa ovat molemmissa maissa siis samanlaiset, mutta Suomessa maakaapelien ja maan pinnan välille vaaditaan kuitenkin enemmän maata kuin Ruotsissa.

Routa tarkoittaa maan huokosissa olevan veden jäätymisen takia jäätynyttä maakerrosta. Routaantuminen on maassa olevan veden jäätymistä. Routimisella tarkoitetaan ilmiötä, jossa maakerroksen routaantuessa sen tilavuus kasvaa, ja sillä usein viitataan maan jäätymisestä ja sulamisesta aiheutuviin mahdollisesti haitallisiin ilmiöihin kuten routanousuun ja sulamispehmenemiseen. Routivan maakerroksen tilavuuden kasvu ilmenee maanpinnan kohoamisena eli routanousuna tai nousun esteenä oleviin rakenteisiin kohdistuvana routimispaineena. [Pesu J., 2010]

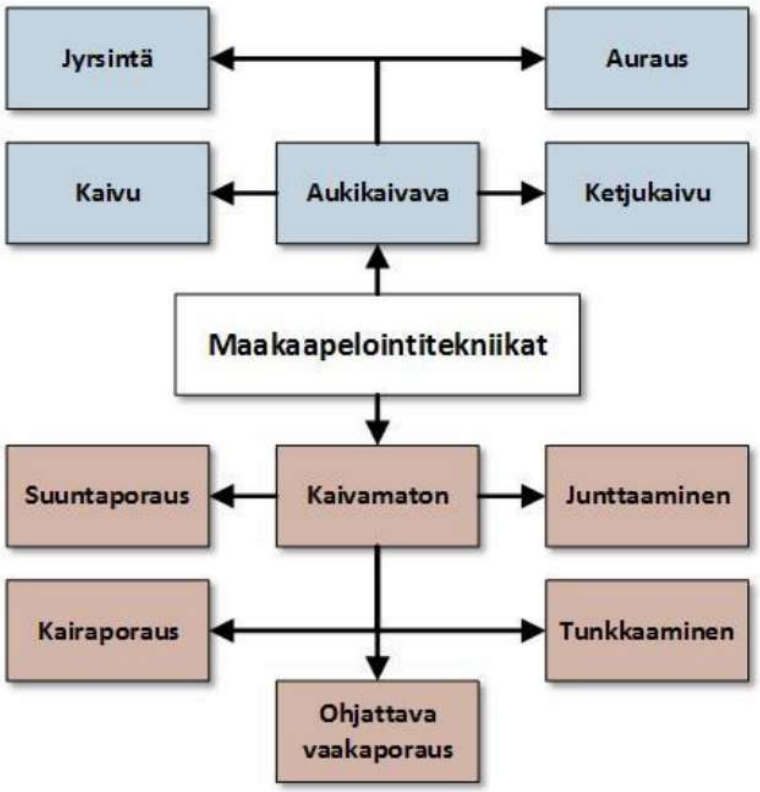
Routa voi liikuttaa maakaapelin läheisyyteen maakaapelin asennuksessa jääneitä kiviä, jotka voivat liikkuessaan vahingoittaa suojaamattoman maakaapelin vaippaa siten että kosteus pääsee vaipan alle, lyhentäen kaapelin käyttöikää ja heikentäen kaapelin luotettavuutta. Maakaapelin oikeaoppisessa asennuksessa kaapelin alla oleva maa-aines pitäisi vaihtaa hienojakoisempaan ainekseen, ja kaapelin alta poistaa sitä mahdollisesti vahingoittavat kivet, mutta pitkän ajan kuluessa on mahdollista, että oikeaoppisestikin asennetun kaapelin luo nousee kiviä roudan vaikutuksen ansiosta. Yksi mahdollisista selityksistä Ruotsin matalammalle asennussyvyydelle olisi se, jos Ruotsissa routaraja olisi matalammalla kuin Suomessa, jolloin maan kaivuu olisi Suomessa helpompaa kuin Ruotsissa ja siksi kaapeleiden tavoitesyvyydeksi olisi Suomessa määritelty Ruotsia suurempi syvyys.

Maalajit Suomessa ja Ruotsissa ovat käytännössä samat, erojen maiden välillä ollessa yhtä suuria kuin erot maiden sisällä, joten maiden routivuuksien voidaan todeta olevan samat maaperien osalta. Ruotsin eteläkärki on lähempänä Päiväntasaajaa kuin Suomen eteläkärki, jolloin eteläisen Ruotsin roudan syvyys on luonnollisesti matalampi kuin eteläisen Suomen. Vuoden 2021 alkupuolella Kaisaniemen mittausasemalla Helsingissä eteläisessä Suomessa routaraja oli 0,05 m kun taas Kittilän mittausasemalla Pohjois-Suomessa routaraja oli parhaimmillaan 1 m [Suomen ympäristökeskus, 2021]. Samana vuonna Malmön lähellä Etelä-Ruotsissa sijaitsevalla Åkarpin mittausasemalla ei routaa ollut lainkaan maan ylimpien kerrosten pysyessä lähes koko vuoden 0 °C yläpuolella helmikuun puolivälin mittaustuloksia lukuun ottamatta [Trafikverket, 2021]. Pohjois-Ruotsissa Svappavaaran mittausasemalla päästiin 2021 vuoden alussa noin 1,6 m routasyvyyteen. Svappavaara ja Kittilä ovat samalla leveysasteella, mutta Svappavaara on yli 100 m korkeammalla meren pinnasta kuin Kittilä mikä selittää eron roudan syvyydessä. Samalla leveysasteella ja samalla korkeudella merenpinnasta ei routarajoissa Suomen ja Ruotsin välillä ole merkittävää eroa mikä selittäisi eron maakaapeleiden asennussyvyydessä.

3.3 Kaapeleiden asentaminen

Maakaapelin asennustapa vaikuttaa kaapeliasennuksen kustannuksiin ja toiminnan luotettavuuteen, sekä siihen minkälaista maakaapelia asennuksessa voidaan käyttää. Työssä tarkastellaan kaivinkoneella suoritettavaa aukikaivavaa maakaapelointitekniikkaa, mutta

maakaapelointitekniikoita on useita erilaisia. Maakaapelointitekniikat voidaan jakaa maan auki kaivaviin ja kaivamattomiin menetelmiin. Tekniikoiden jaottelu on avattu kuvassa 3.2.



Kuva 3.2 Yleisimmät aukikaivavat ja kaivamattomat kaapelointitekniikat [Konttinen 2017]

Aukikaivavissa tekniikoissa kaivetaan kaapelioja maanpintaa rikkomalla, jonka pohjalle maakaapeli sijoitetaan. Näitä tekniikoita ovat jyrsintä, auraus, ketjukaivu tai tavallinen kaivu. Tavallinen kaivu suoritetaan kaivinkoneen kauhan avulla. Muissa tekniikoissa käytetään kaapelointitapaan erityisesti suunniteltua laitetta eli nämä vaativat urakoitsijalta valittuun maakaapelointitapaan soveltuvan erikoislaitteiston hankkimista. Kaivuutekniikka on käytössä sekä Suomessa että Ruotsissa.

Kaivamattomissa asennustekniikoissa asennus toteutetaan ilman kaapeliojaa, eli kaapeli saadaan asennettua ilman että maanpinta rikotaan koko kaapelin asennuspituuden matkalta. Esimerkkejä kaivamattomista tekniikoista ovat suuntaporaus, tunkkaaminen, junttaaminen, kairaporaus ja ohjattava vaakaporaus. Kaivamattomia tekniikoita käytetään tyypillisesti poikkeuksellisissa asennuskohteissa, joissa kaivavia asennustekniikoita ei voida käyttää tehokkaasti

kuten teiden tai jokien alituksissa. [Konttinen 2017, 17] Kaikki kaivamattomat kaapelointitekniikat tarvitsevat erikoislaitteistoa.

3.4 Pienjännitemaakaapeliasennuksen vaatimukset Suomessa

Maakaapelien asennuksia Euroopassa ohjaavat yleiseurooppalaiset lait ja säädökset ja näitä täydentämään laaditut maakohtaiset lait ja asetukset. Pienjännitesähköasennuksia Suomessa käsittelevää SFS 6000 -standardisarjaa päivitetään viiden vuoden välein, uusin versio SFS 6000 -standardista on julkaistu elokuussa 2022. Uusimpaan versioon standardista on määritelty käytettävien kaapelisuojaputkien halkaisijat kullakin asennussyvyydellä 0,7 m ja 0,3 m välillä sekä kovennettu vaatimuksia kaapelin suojaputkien vahvuuksista käytettäessä yli 100 mm^2 suojaputkea. Tässä osiossa viitataan elokuussa 2022 julkaistuun versioon standardista.

Suomessa standardisarjan SFS 6000 osassa 8-814 esitetään vaatimukset maahan tai veteen asennettavien kaapelien valintaan, asentamiseen ja suojaukseen. Maakaapelien suojauksen tarve riippuu kaapelin rakenteesta, ja asennussyvyyteen vaikuttavat myös paikalliset olosuhteet kuten maan laatu, routivuus, käyttötarkoitus (esimerkiksi viljely) sekä maakaapelin yläpuolisen liikenteen määrä ja sen luonne (tie vai satunnaisia ajoja esim. pihalla).

Energiateollisuuden verkostosuosituksessa RK 1:16 [Verkostosuositus RK 1:16 2016] on standardissa SFS 6000:8:814 mainittujen ohjeiden lisäksi suositeltu asennussyvyyttä määriteltäessä huomioitavaksi myös

- Ojien perkaus- ja syventämisvara
- Maanmuokkausvara
- Salaojien sijainti ja upotussyvyys
- Muutokset tulevaisuudessa, esimerkiksi uudet ojat tai tieparannushankkeet
- Kaapelin tärkeys

Erityisvaatimuksia kaapeleiden asennussyvyyksistä kaapelin käyttötarkoitukseen on standardisarjan SFS 6000 osissa 7-7XX. Jakeluverkkoja koskevat vaatimukset on esitetty standardin SFS 6000 osassa ’’8-801: Täydentävät vaatimukset. Jakeluverkot.’’, mutta kyseisessä standardissa

ei esitetä maakaapeliojaan tai maakaapelin asennukseen tiukennuksia mitä ei SFS 6000:8-814 jo mainita.

Standardi SFS 6000-8-814 määrittää kosketussuojaamattoman maakaapelin asennussyvyydeksi 0,7 m mikäli kaapeli halutaan asentaa ilman mekaanista suojausta. Asennuksen tekijän ja kaapelin haltijan harkinnan mukaan maadoitettavalla metallisella kosketussuojalla varustetut kaapelit voi asentaa 0,3 m syvyyteen ilman mekaanista suojaa.

Maahan asennettava kaapeli tulee suojata kaapeliojan pohjan isoilta tai teräviltä kiviltä tms. esineiltä mekaanisesti esimerkiksi putkella, kouruilla tai täyttämällä kaapelia ympäröivä kerros hienojakoisella hiekalla tai vastaavalla. Kaapeli on myös asennettava siten että siihen ei tule kohdistumaan vetorasitusta tai että kaapeli ei pysty nousemaan liian lähelle maan pintaa ennakoitavien maan liikkeiden kuten maan painumisen tai roudan takia. Edellä mainittua epämieluisaa rasitusta ja liikettä voidaan ennaltaehkäistä esimerkiksi jättämällä asennusten muutoskohtiin kaapelille riittävästi liikevaraa.

Kaapelin yläpuolelle on asennettava standardin SFS-EN 50520 mukainen keltainen varoitusnauha 0,2 m maakaapelin yläpuolelle siten, että kaivaja ei ole vaarassa kaivaa varoitusnauhan ohi suoraan kaapeliin vaan varoitusnauhan pitää tulla ensimmäisenä esiin ojasta. Mikäli maakaapeli asennetaan putkeen, on putken halkaisijan oltava vähintään 1,5-kertainen kaapelin ulkohalkaisijan suuruinen ja putken tunnusväri on keltainen. Mikäli maakaapelin suojaputki asennetaan lähelle keltaisia maakaasuputkia, on kaapelinsuojaputket varustettava lisämerkillä tai suoraan putken päällä kaapelista varoittavalla nauhalla, ettei jää vaaraa sekoittaa maakaasuputkea kaapelinsuojaputkeen. Erikoistapauksissa, kuten suuntaporauksissa, voi putken väri poiketa keltaisesta.

Käytettävää maakaapelityyppiä valittaessa suunnittelija käyttää usein ennalta määriteltyjä kaapelityyppejä, jolloin valinnanvaraa keskenään samanlaisten kaapeleiden välillä ei juurikaan ole. Mikäli maakaapelityyppiä kuitenkin pääsee valitsemaan, on valinnassa otettava huomioon [Verkostosuositus RK 1:16 2016]

- Verkon suojaustapa
- Käytettävä asennussyvyys

- Asennusolosuhteet
- Kaapelilta vaadittava kuormitettavuus ja maan lämpöresistiivisyyden taso
- Kaapelireitti ja kaapelilta vaadittavat taivutussäteet
- Käytettävä asennustekniikka
- Asennuksen ajankohta sekä muut erityisvaatimukset, kuten palosuojauksen vaatimukset kaapelityypin jatkuessa sisätiloihin

Tämän työn kannalta kaapelin asennussyvyys on kiinnostavin kaapelin valintaan vaikuttava tekijä, eikä työssä tarkasteltava 0,15 m muutos asennussyvyydessä vaikuta olennaisesti kaapelilta vaadittaviin ominaisuuksiin. Samat asennustekniikat pätevät 0,55 m ja 0,7 m kaapelien asennuksessa, erona vain se että 0,55 m syvyyteen asennettaessa tavoitesyvyys saavutetaan hiukan nopeammin. Pienjännitekaapeleiden kuormitettavuutta laskiessa korjauskertoimet maa-asennukselle muuttuvat arvosta 1 arvoon 0,97 kaapelin asennussyvyyden ylittäessä 0,71 m [Prysmian Group 2018] Siirryttäessä 0,7 m asennussyvyydestä lähemmäs maanpintaa ei asennussyvyydestä johtuva korjauskerroin kaapelin kuormitettavuudelle muutu.

Energiateollisuuden julkaisemassa verkostosuosituksessa RK 1:16 määritellään standardeja, jotka täyttäviä maakaapeleita on mahdollista käyttää maakaapeliverkon rakentamisessa Suomessa. Nämä standardit ovat:

- SFS 4879 Voimakaapelit 0,6/1 kV, PEX-eristeiset Al- ja Cu-johtimiset kaapelit. Rakenne, testaus ja käyttöohje. Suomalaiset nimet AXMK, AXCMK, XMK ja XCMK.
- SFS 4880 Voimakaapelit 0,6/1 kV. PVC-eristeiset ja -vaippaiset Al- ja Cu-johtimiset kaapelit. Rakenne, testaus ja käyttöohje. Suomalaiset nimet AMCMK ja MCMK.
- SFS 5800 0,6/1 kV voimakaapelit. PEX-eristeiset ja PE-vaippaiset jakeluverkkokaapelit. Rakenne, testaus ja käyttöohje.

Myös muita maakaapelityyppejä voidaan käyttää maakaapelointiin, mikäli ne ovat asennusolosuhteisiin tarkoitettuja ja kaapelityypille asetettuja vaatimuksia noudatetaan.

3.5 Pienjännitemaakaapeliasennukset Ruotsissa ja näiden erot Suomeen

Ruotsissa standardi SS 424 14 37 määrittelee maassa voimassa olevat vaatimukset pienjännitemaakaapeleiden asennusta koskien. Standardin uusin versio eli 6. painos on vuodelta 2008 eikä Ruotsissa ole samanlaista viiden vuoden aikajännettä tämän standardin uusimisessa kuten Suomessa. Standardi sisältää Suomen SFS 6000 -sarjaa vastaavia säädöksiä kaapeleiden sallituista taivutussäteistä, hyvistä asennustavoista ja hyvistä asennusolosuhteista.

Ruotsalaisessa standardissa SS 424 14 37 määritellään pienjännitemaakaapeleille kolme eri taulukkoa (3A, 3B ja 3C), joiden avulla kaapelin sallittu asennussyvyys tulee määrittää. Asennussyvyydet ovat erilaiset kaapeleille, jotka asennetaan ylityspaikoille eli auto- tai pyörätien alitse, tien suuntaisesti sijoitetuille kaapeleille ien vierelle sekä muille alueille sijoitettaville kaapeleille. Nämä taulukot on suomennettu ja yhdistetty taulukkoon 3.1.

Taulukko 3.1. Pienjännitemaakaapeleiden asennussyvyydet Ruotsissa (muokattu, taulukko käännetty [SS 424 14 37 2008])

3A Ylityspaikka	**Nimellisjännite [kV]**	**Asennuspaikka**	**Vähimmäistäyttösyvyys [m]**	**Kaapelin suojaus**	**Huomioitava**
	≤ 1	Kävely - ja pyöräilytie	0,25	Vaaditaan	*Maksimissaan 63A sulakkeeen suojaama tievalo tai tieliikenteen laite*
	≤ 24	Päällystetty tie	0,55	Vaaditaan	
		Päällystämätön tie	0,55	Vaaditaan	*Tien pohjan alla*
		Kaapelikanava	0,55	Ei vaadita	
3B Sijoitus tien varrella	**Nimellisjännite [kV]**	**Asennuspaikka**	**Vähimmäistäyttösyvyys [m]**	**Etäisyys tien reunasta**	**Huomioitava**
	≤ 1	Kävely - ja pyöräilytie	0,25	-	*Maksimissaan 63A sulakkeeen suojaama tievalo tai tieliikenteen laite*
	≤ 24	Päällystetty tie	0,55	2,5 m	
		Päällystämätön tie	0,55	2,5 m	
		Kaapelikanava	0,55	-	
3C Muu maa	**Nimellisjännite [kV]**	**Asennuspaikka**	**Vähimmäistäyttösyvyys [m]**	**Kaapelin suojaus**	**Huomioitava**
	≤ 24	Maa, jossa maanmuokkausta tapahtuu	0,55	Ei vaadita	*Mahdollinen kyntö ja routanousu huomioitava*
		Maa, jossa maanmuokkausta ei tapahdu	0,35	Ei vaadita	
	Kaikki	Maa, jossa normaalia asennussyvyyttä ei voida saavuttaa	-	Vaaditaan	*Osion 10 mukainen suojaus*
		Avoin sijainti kalliolla, pylväällä tai rakennustyömaalla	-	Putki tai puoliputki 1,5 metriä kaapelin yläpuolelle	*Jos merkittävä vioittumisriski, suojattava osion 10 mukaisesti*

Ruotsissa voidaan asentaa kosketussuojaamaton maakaapeli 0,35 m syvyyteen ilman suojaputkea paikassa, jossa ei tapahdu maanmuokkausta eli kylvöä. Muualla kosketussuojaamattoman maakaapelin voi asentaa 0,55 m syvyyteen. Ruotsissa maakaapelin suojaputken halkaisijakin

voi olla pienempi kuin Suomessa – Ruotsissa suojaputken halkaisijan on oltava vain 1,2-kertainen sen sisään tulevan kaapelin ulkohalkaisijaan nähden. Kuten taulukosta 3.1 nähdään, Ruotsissa on määritelty erikseen tieliikenteen käyttöön tulevien pienehköjen laitteiden kuten liikennevalojen tai vastaavien syöttökaapeleiden asennussyvyys. Suomessa kyseiset kaapelit kuuluisivat 0,7 m siinä missä asiakkaan liittymisjohdotkin.

Suomessa liittymiskaapelit asennetaan asiakkaan liittymispisteelle ja siitä eteenpäin asiakkaan urakoitsija on vastuussa kaapelista. Ruotsissa asiakkaan urakoitsija on vastuussa suojaputken asentamisesta asiakkaan tontille, ja kaapeli itsessään tulee kokonaan jakeluverkkoyhtiöltä ja asennetaan jakeluverkkoyhtiön urakoitsijoiden toimesta.

Maakaapelien asennussyvyys Ruotsissa on muuttunut standardin SS 424 14 37 painosten neljä ja viisi välillä. Neljännessä painoksessa asennussyvyys alle 24 kV kaapeleille oli 0,65 m ja 0,45 m mikäli kaapeli sijaitsi suojaputkessa. Viides painos julkaistiin vuonna 2000 ja silloin tulivat voimaan taulukossa 3.1 olevat asennussyvyydet. Suomessa maakaapelointistandardin mukaista asennussyvyyttä ei ole muutettu vaan suositus 0,7 m on ollut voimassa ainakin vuonna 2007 julkaistusta SFS 6000-8-814 versiosta asti.

3.6 Sähkötapaturmat Suomessa ja Ruotsissa

Ruotsin väkiluku on melkein kaksinkertainen Suomeen verrattuna, mutta sähköalan ammattihenkilöiden lukumäärässä maat eivät ole yhtä kaukana toisistaan. Suomen sähköalan ammattihenkilöiden lukumäärästä, eli sähköasentajan koulutuksen saaneista ja alalla toimivista henkilöistä ei ole tarkkaa tietoa saatavilla, mutta sähköpätevyys 1 ja 2 haltijoiden lukumäärästä on. Sähköpätevyys 1 on Suomessa noin 6500 henkilöllä, ja sähköpätevyys 2 noin 14 000 henkilöllä, eli sähköpätevyys 1 & 2 haltijoita Suomessa on yhteensä noin 20 500 henkilöä [SETI 2022]. Ruotsissa Suomen sähköpätevyyksiä 1 ja 2 vastaavat A Fullständig auktorisation sekä AL Auktorisation lågspänning. A-pätevyys on Ruotsissa 11 367 henkilöllä ja AL pätevyys 19 616 henkilöllä, eli tarkastelua varten Ruotsin sähköalan ammattihenkilöiden lukumäärä on 30 983, pyöristettynä 31 000 [Elsäkerhetsverket 2022a].

Tukes eli turvallisuus- ja kemikaalivirasto on Suomen lupa- ja valvontaviranomainen, joka edistää tuotteiden, palveluiden ja teollisen toiminnan turvallisuutta ja luotettavuutta. Suomessa

sattuneiden sähkötapaturmien taustoja voi selvittää Tukesin ylläpitämän VARO-rekisterin [Tukes 2021b] sekä Tapaturmavakuutuskeskuksen (TVK) ylläpitämän rekisterin tietojen pohjalta. VARO-rekisteriin ei kirjata kaikkia Tukesin tietoon tulleita tapauksia, vaan Tukesin asiantuntijat käyttävät omaa harkintaansa päättäessään, että kirjaavatko tapaturman auki VARO-rekisteriin. VARO-rekisteri ei siis ole kattava katsaus kaikista Tukesille tiettynä vuonna ilmoitetuista sähkötapaturmista.

Tukes on julkaissut sivuilleen [Tukes 2022] taulukon sähkötapaturmien määrästä Suomessa, jossa on laskettu yhteen kummankin edellä mainitun rekisterin, ja rekisterin ulkopuolisten tietojen, perusteella tehty kooste Suomessa sattuneista sähkötapaturmista. Tapaturmavakuutuskeskuksen luvut sisältävät kaikki työtapaturmat, jossa vahingoittumistapana on ollut sähköisku, ja taulukon rivi ’’TVK:n rekisteri, sähköiskut (sähkölaitteiden asentajat ja korjaajat***)’’ sisältää kaikki TVK:lle ilmoitetut sähköalan sähköalan ammattilaisille eli rakennussähköasentajille, muille sähköasentajille ja linja-asentajille ja -korjaajille tapahtuneet työtapaturmat. Tapaturmavakuutuskeskuksen luvut eivät sisällä vapaa-ajan sähkötapaturmia eikä vapaa-ajan tapaturmista tule juurikaan ilmoituksia Tukesillekaan. Valokaarista johtuvia tapaturmia taulukossa ei ole. Edellä mainittu taulukko Suomen sähkötapaturmista on taulukossa 3.2.

Taulukko 3.2 Sähkötapaturmien määrä Suomessa 2017–2021, muokattu alkuperäisestä lähteestä [Tukes 2022]

Tilastovuosi	2017	2018	2019	2020	2021
VARO-rekisteri (kaikki)	**118**	**122**	**144**	**135**	**154**
VARO-rekisteri (sähköalan ammattilaiset)	55	55	67	68	85
TVK:n rekisteri, sähköiskut (kaikki)	**785**	**831**	**914**	**676**	**778***
TVK:n rekisteri, sähköiskut (sähkölaitteiden asentajat ja korjaajat***)	171	188	224	168	185*

Suomessa ei ole vapaasti saatavilla tämän tarkempia tietoja sähkötapaturmista tai niitä edeltäneistä tapahtumista. Vapaasti selattavan VARO-rekisterin läpikäyminen on työlästä ja koska sinne ei kirjata kaikkia sähkötapaturmia, työn kannalta turhaa. Tarkempaa tietoa on saatavilla, mutta se on erikseen tilattavan hintavan tietopyynnön ja selvitystyön takana eikä tietoja kerätä julkaistavaksi tilastomuodossa kuten Ruotsissa. Ruotsissa sähköturvallisuutta valvova virasto julkaisee tilaston sähkötapaturmista joka vuosi.

Ruotsin sähköturvallisuutta valvova virasto Elsäkerhetsverket julkaisee vuosittain raportin edellisvuoden sähköonnettomuuksista. Taulukossa 3.3 on 2021 vuoden raportin [Elsäkerhetsverket 2022] taulukko 17 sähköalan ammattilaisille sattuneista onnettomuuksista vuosien 2017 ja 2021 välillä suomennettuna. Kiinnostavaa työn kannalta taulukossa on se, että siinä on eritelty maakaapelionnettomuudet, joiden lukumäärä vuonna 2021 oli 12.

Taulukko 3.3 Sähköasentajille tapahtuneet sähköonnettomuudet Ruotsissa onnettomuuden lähteen tai onnettomuushetken tapahtuman mukaan 2017-2021, muokattu alkuperäisestä ruotsinkielisestä lähteestä [Elsäkerhetsverket 2022]

Tilastovuosi	2017	2018	2019	2020	2021	Kokonaissumma
Liitäntälaitteet (kytkinlaitteisto, keskus, kaapeli, ohjauskaappi) sis. Kodinkoneet	79	86	93	83	72	**413**
Kiinteä asennus ryhmäjohtoon sis. Kaapelin	60	59	61	49	62	**291**
Tuntematon	15	34	37	27	61	**174**
Koneet, nostolaitteet jne. ja muut laitteet	18	16	14	13	8	**69**
Muu kaapeli	6	9	13	10	15	**53**
Muunnossovellus (muuntaja, tasasuuntaaja, generaattori, akku, kondensaattori, paristo jne.)	7	6	12	3	9	**37**
Ilmajohto	4	6	6	13	3	**32**
Maakaapeli	11	6	7	11	12	**47**
Mittauslaitteet	2	4	9	4	5	**24**
Muu	5	1	3	4	4	**17**
Ajojohdin tai kosketuskisko käytön aikana	4	0	8	3	2	**17**
Lämmityskaapeli tai lämmitysfolio	0	0	0	0	1	**1**
Kokonaissumma	**211**	**227**	**263**	**220**	**254**	**1175**

Elsäkerhetsverketin julkaisemissa raporteissa on vuodesta 2017 lähtien on ollut taulukko, jossa on eritelty sähköasentajille tapahtuneiden onnettomuuksien lähteet. Maakaapelionnettomuuksien tilastoinnissa ei ole mukana maallikoille tai esimerkiksi maanviljelijöille sattuneita onnettomuuksia – Elsäkerhetsverketin tilaston maakaapelionnettomuus tarkoittaa vain maakaapelien parissa työskenneiden sähköalan ammattilaisten kokemia onnettomuuksia jotka on raportoitu virastolle. Maallikoille tapahtuneista sähkötapaturmista ei Ruotsin osalta ole tietoja saatavilla.

Elsäkerhetsverket julkaisee myös tiedon siitä millä toimialalla sähkötapaturman saanut oli työskennellyt tapahtuman aikana. Taulukossa on vuoden 2021 raportista [Elsäkerhetsverket 2022] sähkötapaturman kokeneiden sähköalan ammattihenkilöiden toimialat.

Taulukko 3.4 Sähköalan ammattihenkilöille tapahtuneet sähköonnettomuudet Ruotsissa toimialan mukaan 2017-2021, muokattu alkuperäisestä ruotsinkielisestä lähteestä [Elsäkerhetsverket 2022]

Tilastovuosi	2017	2018	2019	2020	2021	Kokonaissumma
Sähköverkko, sähkönjakelu	54	64	71	71	62	**324**
Kaivokset, teollisuus	56	50	58	54	49	**267**
Kauppa, kuljetus jne.	27	29	27	16	16	**115**
Hallinto, terveydenhuolto ja sairaanhoito	27	27	31	24	25	**134**
Kotitalous ja asuminen	18	25	31	9	29	**112**
Rakennustoiminta	20	20	28	28	33	**129**
Sähköinen rautatieliikenne	8	7	12	11	8	**46**
Tuntematon	1	5	5	5	32	**48**
Maatalous, metsätalous	0	0	0	0	0	**0**
Kokonaissumma	**211**	**227**	**263**	**218**	**254**	**1175**

Suurin osa sähköonnettomuuksista Ruotsissa tapahtuu sähköverkon parissa työskennellessä, kuten taulukosta 3.4 voidaan nähdä, mutta maallikoille onnettomuusherkin paikka on sairaanhoito. Maallikoiden sattuneiden sähköiskujen tilasto on taulukossa 3.5

Taulukko 3.5 Maallikoille työn aikana tapahtuneet sähköonnettomuudet Ruotsissa toimialan mukaan 2017-2021, muokattu alkuperäisestä ruotsinkielisestä lähteestä [Elsäkerhetsverket 2022]

Tilastovuosi	2017	2018	2019	2020	2021	Kokonaissumma
Hallinto, terveydenhuolto ja sairaanhoito	78	50	83	72	63	**346**
Kauppa, kuljetus jne.	57	48	57	44	41	**247**
Kaivokset, teollisuus	56	58	64	45	46	**269**
Kotitalous ja asuminen	23	23	19	16	16	**97**
Rakennustoiminta	18	27	19	27	33	**124**
Sähköverkko, sähkönjakelu	12	9	10	6	5	**42**
Sähköinen rautatieliikenne	6	3	3	4	4	**20**
Tuntematon	0	2	3	5	7	**17**
Maatalous, metsätalous	1	1	1	1	0	**4**
Kokonaissumma	**251**	**221**	**259**	**220**	**215**	**1166**

Maallikoille tapahtuneista sähköonnettomuuksista (taulukko 3.5) kiinnostavimpia kohtia ovat rakennustoimintaan sekä sähkoverkkoihin liitttyvät onnettomuudet, joihin kaivinkoneyrittäjät eli maakaapeleiden kannalta riskihenkilöt kuuluvat. Vertailua Suomen ja Ruotsin kaivajille sattuneisiin onnettomuuksiin ei kuitenkaan saatavilla olevin tiedoin voi suoraan tehdä sillä Suomesta ei ole Ruotsin kaltaista tarkkaa valtakunnallista julkaisutietoa

sähköonnettomuuksista, eli tietoa maakaapelin asennussyvyyden vaikutuksesta maakaapeleiden aiheuttamiin sähköonnettomuuksiin ei pysty Suomesta ja Ruotsista julkaistavien tietojen perusteella määrittämään. Suomen tietoja olisi mahdollista saada eriteltynä Tukesilta maksullisen tietopyynnön kautta, mutta tämän työn laajuuden ja työhön käytettävien resurssien osalta erillistä tietopyyntöä ei ole kannattavaa tehdä.

3.7 Yhteenveto maakaapeleiden vaatimuksista ja turvallisuudesta

Suomen ja Ruotsin maaperät sekä ilmastot, ja tätä kautta routarajat, vastaavat toisiaan. Maissa käytetyt maakaapeleiden asennustekniikat ovat samanlaisia ja vaatimukset asennuksia kohtaan vastaavat toisiaan. Ruotsin asennussyvyys on lähempänä maan pintaa ja, ainakin suurimpien verkkoyhtiöiden osalta, suurin osa asiakkaiden pihoille tulevasta maakaapelista asennetaan asiakkaan urakoitsijan asentamaan suojaputkeen.

Turvallisuuskulttuurit ja toimintaympäristöt sähköasennusten ja maakaapelointitöiden suhteen ovat Suomessa ja Ruotsissa hyvin samanlaiset; sähköasennustyöt ovat ammattilaisten suorittamia töitä ja Elsäkerhetsverket sekä Tukes tilastoivat erikseen alan ammattihenkilöille maissa tapahtuneet onnettomuudet, tosin Elsäkerhetsverketin julkaisema tieto on yksityiskohtaisempaa. Elsäkerhetsverket ja Tukes tekevät yhteistyötä kummankin maan turvallisuuskulttuurien ja käytäntöjen parantamiseksi sekä jakavat tietoa keskenään, joten maiden standardit ovat hyvinkin samankaltaiset sähköturvallisuuden ja maakaapeliasennusten osalta. Suurimpana erona maiden maakaapelistandardien välillä onkin maakaapeleiden asennussyvyys, joka Suomessa suojaamattomalle kaapelille on 0,7 m ja Ruotsissa parhaimmillaan vain 0,35 m, mutta käytännössä 0,55 m. Maakaapelionnettomuuksien suurin yhteinen tekijä on standardien vastainen ja huolimaton toiminta, standardien ja ohjeiden mukaan toimiessa ei onnettomuuksia pitäisi voida tapahtua. Maakaapelien asentaminen lähemmäs maanpintaa ei ole lisännyt vakavien ja ammattihenkilöille tapahtuvien onnettomuuksien määrää Ruotsissa Suomeen verrattuna. Suomessa tapahtuu TVS:n ja Tukesin tilastojen perusteella hiukan vähemmän sähkötapaturmia ammattihenkilöille kuin Ruotsissa, mutta koska Ruotsissa sähköalalla työskentelee noin kolmannes enemmän ihmisiä kuin Suomessa, eivät onnettomuusmäärät ole toisistaan poikkeavia.

4 MAAKAAPELIASENNUKSEN ELINKAARIKUSTANNUSLASKENTA

Maakaapelin asennussyvyyden kustannusten tarkastelussa on tärkeää huomioida maakaapelin vaihtoehtoisen asennussyvyyden vaikutukset maakaapelin elinkaarikustannuksiin. Mahdollisesta pienemmästä alkuinvestoinnista saatu säästö voi hukkua lähemmäs maanpintaa asennetun maakaapelin suurempiin elinkaarikustannuksiin. Tässä luvussa määritetään raja-arvot maakaapelin alkuinvestoinnille ja elinkaarikustannuksille, joilla maakaapelin vaihtoehtoinen asennussyvyys voi tulla kannattavaksi.

Sähkönjakeluverkkojen suunnittelussa tavoitteena on löytää kokonaiskustannuksiltaan mahdollisimman pienikustannuksinen teknisesti toimiva ratkaisu. Vaikka tarkasteltavan suunnitteluratkaisun alkuinvestointi saattaa olla toista pienempi, voivat sen elinkaarikustannukset kasvaa alkuinvestoinniltaan kalliimpaa ratkaisua suuremmiksi. Suunnitteluratkaisun elinkaarikustannukset saadaan selville minimointitehtävällä suunnittelujakson aikana syntyvien investointi-, häviö-, keskeytys- ja ylläpitokustannuksista muodostuvien kokonaiskustannusten nykyarvolle. Tämän yhtälö (4.1) on esitetty suunnittelujakson vuosikustannusten nykyarvojen summana.

$$\begin{aligned} &\min \int_0^T \left(K_{\mathrm{inv}}(t) + K_{\mathrm{häv}}(t) + K_{\mathrm{kesk}}(t) + K_{\mathrm{kun}}(t)\right)\mathrm{d}t \approx \\ &\min \sum_{t=1}^{T} [K_{\mathrm{inv}}(t) + K_{\mathrm{häv}}(t) + K_{\mathrm{kesk}}(t) + K_{\mathrm{kun}}(t)] \end{aligned} \tag{4.1}$$

missä $K_{\mathrm{inv}}(t)$ on investointikustannukset ajanhetkenä t (vuonna t), $K_{\mathrm{häv}}(t)$ on häviökustannukset ajanhetkenä t (vuonna t), $K_{\mathrm{kesk}}(t)$ on keskeytyskustannukset ajanhetkenä t (vuonna t), $K_{\mathrm{kun}}(t)$ on kunnossapitokustannukset ajanhetkenä t (vuonna t) ja T on suunnittelujakson pituus [a]. (Lakervi & Partanen 2008)

4.1 Investointikustannukset

Investointikustannukset muodostuvat saneerattaviin verkonosiin tehtävistä investoinneista ja uuden verkon rakentamisesta. Maakaapeliasennuksissa investointeihin kuuluvat siis kaikki maakaapelin alkuperäiseen asennukseen liittyvät työt, kuten kaapeliojan kaivuu, maakaapelin materiaali, mahdollinen maakaapelin suojaputki ja suojaus, maakaapelin kytkentä verkkoon ja esimerkiksi jakeluverkkoyhtiön maakaapelin kytkentä asiakkaan tonttinsa rajalle tuomaan maakaapelin jatkoksella.

Tarkastelun kohteena on maakaapelin asennussyvyys, joka vaikuttaa investointikustannuksista maakaapelin materiaalikustannuksiin sekä maakaapeliojan kaivuukustannuksiin. Maakaapelin asennus oletetaan saman kustanteiseksi riippumatta maakaapelin asennussyvyydestä, sillä kaivuukustannukset sisältävät yksiköt, kuten kaivuun, massanvaihdon ja tiivistykset joihin maakaapelin muuttunut asennussyvyys vaikuttaa.

Mikäli matalammalla asennussyvyydellä käytetään samaa reittiä kuin syvemmällä asennussyvyydellä, tarvittavan maakaapelimäärän pituus pienenee, sillä maakaapelia tarvitaan hiukan vähemmän reitin alku- ja loppupäässä haluttuun syvyyteen pääsemiseksi ja sieltä nousemiseksi. On kuitenkin mahdollista, että matalampi asennussyvyys tuo kaapelin käytettäväksi uusia ja suorempia reittejä, joten maakaapelin materiaalikustannuksissa saatava pieni säästö jätetään investointilaskennassa huomiotta. Uusien kaapelireittien tuomaa säästöä tarkastellaan tapausesimerkkien kautta, joissa matalamman asennussyvyyden mahdollisesti sallimat uudet reitit on helpompi huomioida. Maakaapelin asennussyvyys ei vaikuta kaapelin poikkipintaan, joten maakaapelin materiaalikustannukset jätetään elinkaarilaskennassa huomioimatta.

Maakaapelin investointikustannukset ovat tämän työn tapauksessa riippuvaisia pelkästään maakaapelin kaivuukustannuksista. Maakaapelin asennussyvyyden vaikuttamat investointikustannukset elinkaarikustannusten tarkasteluajalle saadaan yhtälöstä 4.2

$$K_{\mathrm{inv}}(t) = l_{oja} \cdot K_{\mathrm{kaivu}} \tag{4.2}$$

missä t on maakaapelin elinkaarikustannusten tarkasteluaika [a], l_{oja} on kaapeliojan pituus [km] ja K_{kaivu} on maakaapelin kaivuukustannus [€/km]. Kaivuukustannus K_{kaivu} muuttuu käytössä olevan asennussyvyyden mukaan, mutta lähtökohtana työssä käytetään K_{kaivu} arvoina Energiaviraston yksikköhintoja ympäristöolosuhdeluokkien mukaan [Energiavirasto 2021e]. Investointikustannus tapahtuu vain ensimmäisenä tarkasteluvuonna kaapelin elinkaaren aikana, joten yhtälöstä 4.2 saatavaa tulosta ei tarvitse diskontata ensimmäiselle vuodelle vaan se on vertailukelpoinen sellaisenaan.

4.2 Häviökustannukset

Siirrettäessä energiaa paikasta toiseen syntyy häviöitä, joiden kustannukset riippuvat käytetyn kaapelin poikkipinnasta, siirtoetäisyydestä, siirrettävän tehon määrästä sekä energian hinnasta. Maakaapelin asennussyvyys vaikuttaa edellä mainituista osatekijöistä ainoastaan siirtoetäisyyteen.

Maakaapelin asentaminen 0,15 m lähemmäs maan pintaa pienentää kaapelipituutta 0,3 m, mikäli kaapeli asennettaisiin matalammalla asennussyvyydellä täsmälleen samaan sijaintiin kuin aikaisemmin. Muutos siirtoetäisyydessä tulee kaapelin alku- ja loppupään 0,15 m säästöistä kaapelin pituudessa kaapelia ojaan laskettaessa. Muutos kaapelin pituudessa on niin pieni, että se jätetään työssä huomiotta häviöiden osalta. Häviökustannuksiin vaikuttavat tekijät katsotaan siis samoiksi kaapelin asennussyvyydestä riippumatta, joten häviökustannukset jätetään vertailussa huomioimatta.

4.3 Keskeytyskustannukset

Keskeytyskustannukset ovat normaalista sähköntoimituksesta tapahtuvien poikkeuksien aiheuttamia kustannuksia. Merkittävä osa keskeytyskustannuksista tulee keskijänniteverkon vioista, mutta tässä työssä keskitytään pienjänniteverkkoon, joten keskeytyskustannukset ovat verrattain pieniä. Tarkastelussa on maakaapeliverkko, joten jälleenkytkentöjen osuus keskeytyskustannuksista jätetään huomiotta – pika- ja aikajälleenkytkennät ovat seka- tai ilmajohtoverkkojen ominaisuuksia jälleenkytkennöillä korjaantuvia vikoja varten. Maakaapeliverkon viat ovat pysyväluonteisempia vikoja, joiden korjaus vaatii keskeytyksen. Tällöin keskeytyskustannukset maakaapeliverkossa muodostuvat pelkästään suunnitelluista ja suunnittelemattomista keskeytyksistä.

Maakaapelin asennussyvyyden pienentäminen ei lyhennä suunniteltujen keskeytysten pituutta. Maakaapelia uusittaessa suunnitellun keskeytyksen aikana suoritetaan uuden maakaapelin asennus mahdollisimman pitkälle ilman keskeytystä, sillä on verkonhaltijan etu, että asiakkaiden kokemat keskeytykset ovat mahdollisimman lyhyitä. Uusi maakaapeli asennetaan uudelle reitille ja vanha, korvattava maakaapeli jää useimmiten maahan käyttämättömäksi maakaapeliksi. Mikäli maakaapeli on asennettu putkeen, ja asennettu putki on tarpeeksi suuri ottamaan

vastaan korvaavan kaapelin, lyhentää kaapelin asennussyvyys aikaa, joka kuluu kaapelin pujotusmontun kaivamiseen. Kaapelin pujotusmontun kaivamisessa saavutettava ajansäästö on kuitenkin hyvin pieni osa keskeytyksen aikana tehtävästä työstä eikä merkittävästi lyhennä työhön tarvittavaa keskeytysaikaa. Suunnitellun keskeytyksen keskeytysaika suuremman tai korvaavan kaapelin asennuksessa on riippuvainen vain siitä, kuinka nopeasti vanha kaapeli saadaan syötöstä irti ja uusi kaapeli kytkettyä korvattavan kaapelin tilalle. Maakaapelin asennussyvyys ei vaikuta kaapelin irroitus- tai kytkentäaikaan. Suunnitelluissa keskeytyksissä pienjänniteverkossa kaapelin asennussyvyys vaikuttaa vain hyvin pieneen osaan kaikista töistä, eli käytössä olevan kaapelin korvaamiseen putkessa tai maakaapelin korvaamiseen täsmälleen samaan sijaintiin kuin käytössä oleva kaapeli. Näistä syistä suunnitellut keskeytykset jätetään huomioimatta laskennassa.

Suunnittelemattomat keskeytykset ovat vikoja ja virheitä, mitkä aiheuttavat asiakkaan sähköntoimitukseen keskeytyksen. Maakaapelin äkillisesti vikaantuessa syynä on useimmiten kaivinkoneella suoritettu kaivuu. Kirjallisuudesta ei löytynyt tukea sille, että matalampi asennussyvyys lisäisi maakaapelin vaurioitumisriskiä. Ohjeista ja standardeista välinpitämätön kaivinkoneen käyttäjä saa yhtä helposti 0,55 m asennetun kaapelin kaivettua rikki kuin 0,7 m kaivetun kaapelin, varsinkin mikäli tarkastelussa on helpon tai tavallisen maakaapelin ympäristöolosuhteen kohde.

Keskeytyskustannukset ovat siis tämän työn tapauksessa riippuvaisia pelkästään maakaapelin suunnittelemattomista keskeytyksistä. Suunnittelemattomien keskeytyksen kustannukset saadaan selville yhtälöiden (4.3–4.7) avulla;

$$f_j = \sum f_i \tag{4.3}$$

$$U_j = \sum f_i \cdot t_{hij} \tag{4.4}$$

$$t_{hj} = \frac{U_j}{f_j} \tag{4.5}$$

$$E_j = f_j \cdot h_j \cdot \Delta P_j \tag{4.6}$$

$$K_j = \sum f_i \left[a_j + b_j \left(t_{hij} \right) t_{hij} \right] \Delta P_j \tag{4.7}$$

missä *f* on vikataajuus [kpl/km,a], *U* on keskimääräinen vuotuinen keskeytysaika, t_h vian aiheuttama keskeytysaika tunneissa, *E* on toimittamatta jäänyt energia [kWh], ΔP on keskimääräinen keskeytysteho [kW], *K* keskeytyskustannukset [€], alaindeksi *j* kuvaa sähkönkäyttäjää, alaindeksi *i* verkkokomponenttia, *a* on keskeytystehon haitta-arvo [€/kW] ja *b* on keskeytysenergian haitta-arvo [€/kWh]. (Lakervi & Partanen 2008) *a*- ja *b*-parametrit eri keskeytystyypeille saadaan taulukkoa 4.3 käyttäen.

Taulukko 4.3 Keskeytyksistä aiheutuneen haitan yksikköhinnat vuoden 2005 rahanarvossa (Energiavirasto 2021c)

Odottamaton keskeytys		**Suunniteltu keskeytys**		**Aikajälleenkytkentä**	**Pikajälleenkytkentä**
$h_{E,odott}$	$h_{W,odott}$	$h_{E,odott}$	$h_{E,suunn}$	h_{AJK}	h_{PJK}
€ / kWh	€ / kW	€ / kWh	€ / kW	€ / kW	€ / kW
11	**1,1**	**6,8**	**0,5**	**1,1**	**0,55**

Taulukon 4.3 arvot ovat vuoden 2005 rahanarvossa, joten taulukko täytyy päivittää nykyisen rahan arvoon ennen sen käyttämistä laskentaan. Energiaviraston (Energiavirasto 2021c) mukaan tähän on käytettävä kuluttajahintaindeksin huhti-syyskuun indeksipistelukujen keskiarvoa. Päivitetään taulukko 4.3 vuoden 2022 rahan arvoon käyttäen Kuluttajahintaindeksiä 2005=100 (Tilastokeskus 2022) ja yhtälöä 4.8

$$\Delta KHI_t = \frac{KHI_t}{KHI_{t-1}} - 1 \tag{4.8}$$

missä ΔKHI_t on kuluttajahintaindeksin muutos vuodelle *t*, *t* on tarkasteluvuosi, KHI_t kuluttajahintaindeksin (1995=100) huhti-syyskuun indeksipistelukujen keskiarvo vuonna *t* ja KHI_{t-1} kuluttajahintaindeksin (1995=100) huhti-syyskuun indeksipistelukujen keskiarvo vuonna *t-1*. Laskennassa käytetään 2005=100 kuluttajahintaindeksin arvoja, sillä 1995=100 kuluttajahintaindeksiä ei ole helposti saatavilla. Taulukossa 5.4 on taulukon 5.3 arvot korjattuna vuoden 2022 rahanarvoon.

Taulukko 4.4 Keskeytyksistä aiheutuneen haitan yksikköhinnat vuoden 2022 rahanarvossa

Odottamaton keskeytys		Suunniteltu keskeytys		Aikajälleenkytkentä	Pikajälleenkytkentä
$h_{E,odott}$	$h_{W,odott}$	$h_{E,odott}$	$h_{E,suunn}$	h_{AJK}	h_{PJK}
€ / kWh	€ / kW	€ / kWh	€ / kW	€ / kW	€ / kW
19,1	**1,9**	**11,8**	**0,9**	**1,9**	**1,0**

Yhtälön 4.3 avulla voidaan selvittää keskeytysten kokonaismäärä f_j laskemalla yhteen lähdöllä olevien komponenttien vikataajuus. Tarkastelussa on maakaapeliverkko, ja vertailussa ovat kahteen eri syvyyteen asennetut maakaapelit, joten keskeytysten kokonaismäärä riippuu ainoastaan maakaapelille tulevista vioista. Työssä f_j on siis sama kuin f_i.

Yhtälön 4.4 avulla voidaan selvittää sähkönkäyttäjälle keskimääräinen vuotuinen keskeytysaika U_j maakaapelin vikataajuuden f_i avulla ja arvioimalla maakaapelivian i aiheuttaman keskeytyksen t_{ij} kesto asiakkaalle j. Työssä aika t_{ij} on käytännössä sama, kuin maakaapelivian korjaamiseen kuluva aika. Keskeytyskustannukset pienjännitekaapelin elinkaaren ajalta saadaan yhtälöstä 4.9.

$$K_{kesk}(t) = \kappa_k K_{kesk0} \tag{4.9}$$

missä t on maakaapelin elinkaarikustannusten tarkasteluaika [a], κ_k on keskeytyskustannusten kapitalisointikerroin ja K_{kesk0} on ensimmäisen vuoden keskeytyskustannukset [€]. Kapitalisointikerroin keskeytyskustannuksille κ_k saadaan yhtälöstä 4.10

$$\kappa_k = \psi_k \frac{\psi_k^t - 1}{\psi_k - 1} \tag{4.10}$$

yhtälön 4.11 avulla

$$\psi_k = \frac{1 + \frac{r}{100}}{1 + \frac{p}{100}} \tag{4.11}$$

missä t on tarkastelujakson pituus [a], r on tehon vuotuinen muutos [%/a] ja p käytettävä korkotaso [%].

4.4 Kunnossapitokustannukset

Kunnossapidon tavoitteena on pitää verkoston eri komponentit toimintakuntoisina siten, että pitkällä aikavälillä verkoston investoinneista, keskeytyksistä, käytöstä ja kunnossapitotoimista muodostuvat kokonaiskustannukset minimoituvat. Kunnossapito jaetaan ehkäisevään ja korjaavaan kunnossapitoon. (Lakervi & Partanen 2008)

Verkon komponentteina on jakokaappeja ja niissä oleva varokkeita, mutta jakokaappien ja varokkeiden kunnossapitotarve ei muutu maakaapelin asennussyvyyden muuttuessa. Pienjänniteverkon maakaapeleille ei yleensä tehdä ennakoivaa kunnossapitoa kuten keskijänniteverkon kaapeleille tehtäviä eristysvastus- ja osittaispurkausmittauksia (Lakervi & Partanen 2008). Pienjännitekaapelin kunnossapitotarve määrittyy täysin sen mukaan, että toimiiko kaapeli oikein ja lähestyykö kaapelin kunnossapitostrategiaan määritetty tekninen käyttöikä. Pienjännitekaapeleiden pitoajat ovat pitkiä, helposti yli 50 vuotta. Kaapeleiden ehkäisevän kunnossapidon tarpeeseen ei ole tehty eroa sen mukaan sijaitseeko maakaapeli 0,55 m vai 0,7 m syvyydessä. Suhteellisen pienestä asennussyvyyksien erosta voidaan olettaa, että kunnossapitokustannuksissa ei näillä kahdella tarkasteltavalla asennussyvyydellä pienjännitekaapeleiden osalta ole eroa, joten työssä tarkastellaan vain maakaapeliin kohdistuvaa korjaavaa kunnossapitoa. Korjaavan kunnossapidon kustannukset maakaapelille saadaan yhtälöstä 4.12

$$K_{\mathrm{kun}}(t) = l_{korjausoja} \cdot K_{korjaus} \cdot f \cdot t \tag{4.12}$$

missä $l_{korjausoja}$ on vian korjaamiseksi kaivettavan kaapeliojan pituus [km], $K_{korjaus}$ on pienjännitemaakaapeliin tulleen vian korjauskustannus [€/km], f vikataajuus eli tarkasteluajalla vuosittain korjattavien vikojen lukumäärä [kpl/ojapituus, a] ja t on kaapelin kunnossapitokustannusten tarkasteluaika [a].

4.5 Kokonaiskustannukset

Alilukujen 4.1 – 4.4 ja yhtälön (4.1) avulla voidaan muodostaa yhtälö (4.13) maakaapelin elinkaarikustannuksiksi tarkasteluajalta tarkasteluvuodelle diskontattuna

$$K_{kok}(t) = K_{inv}(t) + K_{häv}(t) + K_{kesk}(t) + K_{kun}(t) \quad (4.13)$$

missä K_{kok} maakaapeliasennuksen elinkaarikustannukset tarkasteluajalta [€], t on maakaapeliasennuksen elinkaarikustannusten tarkasteluaika [a], K_{inv} maakaapeliasennuksen investointikustannukset tarkasteluajalta [€], $K_{häv}$ maakaapeliasennuksen häviökustannukset tarkasteluajalta, K_{kesk} maakaapeliasennuksen keskeytyskustannukset tarkasteluajalta ja K_{kun} maakaapeliasennuksen kunnossapitokustannukset tarkasteluajalta [€].

Tarkasteltavien asennussyvyyksien välinen ero häviökustannuksissa todettiin luvussa 4.2 niin pieniksi, että ne voidaan jättää huomiotta. $K_{häv}$ on siis työssä suoritettavan laskennan kannalta 0.

5 MAAKAAPELIOJAN KUSTANNUKSET

Tässä luvussa tarkastellaan maakaapeliojan kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä sekä niiden vaikutuksia maakaapeliasennuksen alkuinvestointiin. Ensimmäisessä aliluvussa tarkastellaan suoraan kaapeliojan kustannuksia ja eri hinnoitteluvaihtoehtojen vaikutuksia, sekä lasketaan auki muuttuneen maansiirtokustannuksen kustannus, mikäli nykyiset yksikköhinnat pätisivät suoraan myös matalamman ojan kaivamiseen. Toisessa aliluvussa perustellaan asennussyvyydestä johtuvan pienen kaapelin pituuden muutoksen pois jättäminen tapaustarkasteluista.

5.1 Kaivuutyön hinnoittelu siirretyn maa-aineksen kautta

Jakeluverkkoyhtiöiden käyttämät verkonrakentajat käyttävät usein paikallisia toimijoita maanrakennustöihin. Maanrakennusurakoitsijat hinnoittelevat työnsä verkonrakentajille yksikköhintojen tai erillisten sopimusten kautta. Luvussa suoritettavaan tarkasteluun maakaapelin asennussyvyyden vaikutuksista kustannuksiin on käytetty erään maanrakennusurakoitsijan verkonrakentajalle suorittaman urakan laskua, jossa maakaapelointia varten tehty maanrakennustyö on hinnoiteltu käyttäen kaivuutyön yksikkönä kuutiometriä.

Kaivuu-urakkaan käytettävä aika vaihtelee huomattavasti saman maanrakennusurakoijan eri töissä. Kartalla saman pituista kaivuutyötä varten voidaan joutua esimerkiksi rikkomaan asfalttia, alittamaan teitä tai noudattamaan kaivaessa erityistä varovaisuutta alueella kulkevien muiden rakenteiden, kuten keskijännite- ja suurjännitekaapeleiden tai maakaasuputkien vuoksi. Vaihtoehtoisesti kaivuutyö voidaan suorittaa melko nopeastikin, mikäli alueella ei alkuselvitysten perusteella sijaitse muuta infraa ja kaivettava reitti on esimerkiksi helposti kaivettavaa pellon reunaa. Tämän vaihtelevuuden vuoksi kaivuuyrittäjien ja verkonrakentajien välisissä sopimuksissa on edellisessä kappaleessa mainitun kuutiometriyksikön lisäksi laskutettavia lisäyksiköitä vaihtelevien työkohteiden tuomien lisäkulujen huomioimiseen, mutta seuraavassa tarkastelussa jätetään lisäyksiköt huomiotta ja keskitytään puhtaasti kaivuuyrittäjän verkonrakennuttajalta veloittamaan kuutiometriyksikköön kaivuusuorituksestaan.

Kuutiometriyksikkö yksinkertaistetaan tätä laskentaa varten kattamaan kaikki kulut mitä kaivuuyrittäjälle kaivamisesta tulee, maanvaihdosta polttoainekustannuksiin. Esimerkiksi kaivinkoneen suurempi tehontarve ja bensankulutus maa-ainesta kaivettaessa läheltä kaapeliojan

pohjaa kuin bensankulutus ensimmäisten kauhallisten osalta maan pinnasta jätetään huomiotta ja todetaan sisältyväksi kuutiometriyksikköön.

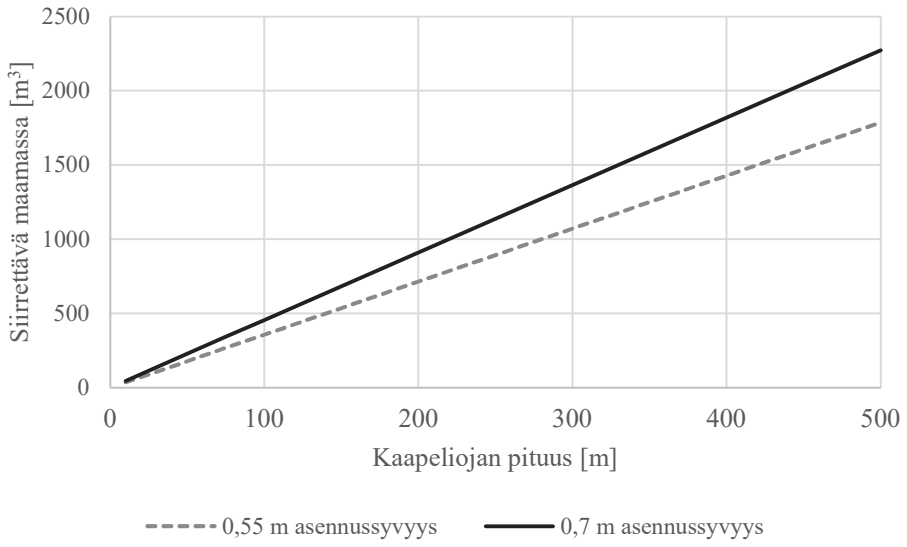
Kaapeliojaa kaivettaessa yhdelle kaapelille kaapelin asennussyvyys on 0,7 m. Yhdelle kaapelille kaivettavan ojan leveydeksi valitaan 0,4 m, eli urakoitsijan hinnoitellessa kaapeliojan hinnan kuutiometrin mukaan tuottaa jokainen kuutiometri enemmän kaapeliojaa kuin yhden metrin. Kaapelioja yksinkertaistetaan suorakulmioksi kuutiometrin yksiköllä tuotettavan ojan pituuden selvittämiseksi. Suorakulmion eli kaapeliojan tilavuus V_{oja} voidaan laskea yhtälöllä

$$V_{oja} = l_{oja} * w_{oja} * h_{oja} \tag{5.1}$$

missä l_{oja} on suorakulmion, eli kaapeliojan, pituus, w_{oja} on kaapeliojan leveys ja h_{oja} on kaapeliojan syvyys. Asennussyvyyttä tarkastellessa kaapelin syvyys mitataan kaapelin vaipan ulkoreunasta, eli käytetyn kaapelin paksuudella ei ole väliä sillä kaapeliojan syvyys eli kaapelin ja maanpinnan välissä olevan maan määrää tarkastellaan kaapelin ylimmästä osasta. Ojan pituuden selvittämiseksi voidaan yhtälöstä 4.1 ratkaista l_{oja}, jonka yhtälö on tällöin

$$l_{oja} = \frac{V_{oja}}{w_{oja} * h_{oja}} \tag{5.2}$$

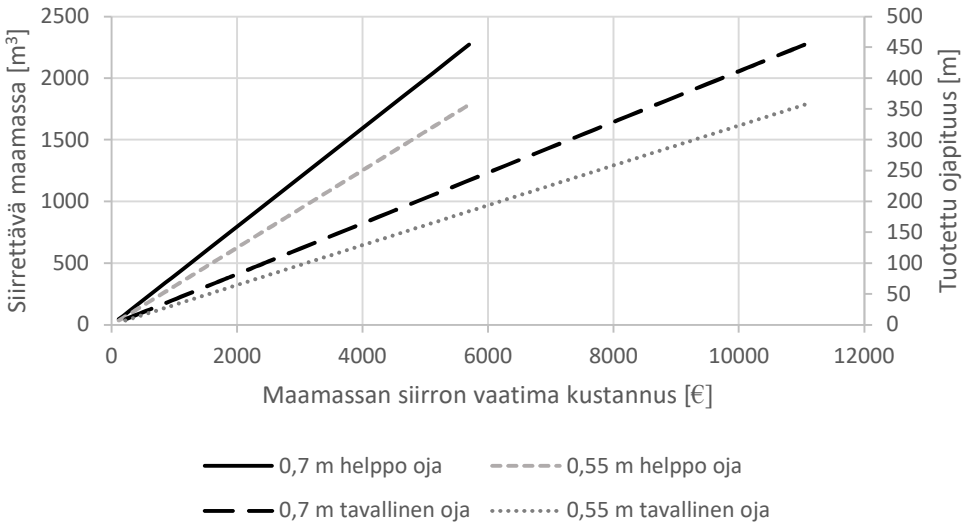
Vertailussa olevat kaapeleiden asennussyvyydet ovat 0,55 m ja 0,7 m. Kaapeliojan leveys yhtä kaapelia varten pysyy vertailuissa muuttumattomana, eli ojan leveys w_{oja} on 0,4 m. Yhtälöä 5.2 ja edellä mainittuja tietoja käyttäen saadaan selville kunkin kaapeliojan pituuden vaatima maansiirron määrä. Asennussyvyyden ollessa 0,7 m kaapeliojaa saadaan aiemmin mainittuja yksinkertaistuksia käyttäen tuotettua noin 0,28 m^3 jokaista tuotettua ojametriä kohden. Asennussyvyyden ollessa 0,55 m vastaava luku on 0,22 m^3 per m. Kunkin asennussyvyyden vaatimat tilavuusyksiköt 500 m kaapeliojaan asti on esitetty kuvassa 5.1.



Kuva 5.1 Kaapeliojaa varten siirrettävä maamassa kahdella kaapelin asennussyvyydellä

Kuvasta 5.1 voidaan nähdä, että ero saadussa kaapeliojan pituudessa eri asennussyvyyksillä kasvaa sitä suuremmaksi mitä enemmän kaapeliojaa on tuotettu kullakin asennussyvyydellä. Esimerkiksi 200 m kaapelioja 0,7 m asennussyvyydellä vaatii 56 m^3 maansiirtoa. Saman pituinen kaapelioja 0,55 m asennussyvyydellä saadaan aikaan 45 m^3. Esitettyjen alkuoletusten ja yksinkertaistusten perusteella, siirtymällä nykyisestä 0,7 m asennussyvyydestä 0,55 m asennussyvyyteen säästettäisiin jokaisessa 200 m yhden kaapelin maakaapeliojassa 11 m^3 liikutettavassa maamassassa.

Käyttämällä Energiaviraston yksikköhintoja kaapeliojan ympäristöolosuhdeluokille [Energiavirasto 2021e] helppo maakaapelioja ja tavallinen maakaapelioja, ja kuvan 5.1 kuvaajia apuna, voidaan määrittää kustannusero kahden asennussyvyyden välille siirrettävän maamassan perusteella. Kuvaan 5.2 on laskettu siirrettävät maamassat 500 m kaapeliojaan asti ja maamassan siirron vaatima kustannus kullekin ojapituudelle, olettaen että luvussa aiemmin määritetty säästö matalamman asennussyvyyden kaapeliojaa varten siirrettävässä maamassassa siirtyisi suoraan verkonrakentajien urakoitsijoiden hinnastoihin ja helpon sekä tavallisen kaapeliojan hinnat pysyisivät samoina molemmille asennussyvyyksille.



Kuva 5.2 Maamassan siirron kustannus kahdella eri asennussyvyydellä ja ympäristöolosuhdeluokalla.

Kuvaajien 5.1 ja 5.2 perusteella 0,55 m kaapelioja toisi säästöjä ojakustannuksissa, sillä samalla ympäristöolosuhdeyksiköllä pystyttäisiin tuottamaan enemmän kaapeliojaa. Energiaviraston yksikköhintoja pyörittelemällä ratkaisu on melko yksinkertainen, ongelmaksi kuitenkin muodostuu maanrakennusurakoijien hinnoittelu.

Maanrakennusurakoijan on lähes mahdotonta määritellä kannattavaa maan siirron yksikköä siirrettävän maan tilavuuden mukaan (tai työn lisäyksiköitä) pelkästään tämänkaltaisen yksinkertaisen tilavuustarkastelun pohjalta, sillä kaivuutyöhön sisältyvien muuttujien määrä on yksinkertaisesti liian suuri. Kaivuutyötä aloittaessa kaivajalla tai verkonrakentajalla ei ole varmuutta maan alla olevista kaikista rakenteista. Maassa voi olla esimerkiksi vanhoja käytöstä poistettuja kaapeleita tai putkia, joita ei ole enää merkittynä mihinkään karttaan ja esimerkiksi lapiomiehen havaitessa paljastuneen kaapelin työt keskeytyvät täysin ja töiden jatkuminen riippuu siitä, kuinka nopeasti kaapelit saadaan tunnistettua. Vaikka reitti käydään katselmoimassa ennen kaivuutöiden aloittamista verkonrakentajan yhteyshenkilön kanssa, ei kaivajalla ole nykytilassa täyttä tietoa esimerkiksi maan alla olevista suurista kivistä, jotka pitää kaivaessa kiertää sillä kaivuureittejä ei tutkata niiden varalta sillä tämä ylimääräinen vaihe ei ole taloudellisesti kannattava, vaan kaivaessa turvaudutaan lapiomiehen ammattitaitoon ja kykyyn havaita kauhan esiin tuomat asiat.

Verkonrakentajalle sen sijaan tämän luvun tilavuustarkastelu tuo mahdollisuuden maansiirron hinnoittelun muuttamiseen, mikäli maakaapeleiden tavoiteasennussyvyys muuttuu. Verkonrakentaja kuitenkin neuvottelee asian läpi paitsi maanrakennusurakoitsijan, usein myös työn tilanneen jakeluverkkoyhtiön kanssa, joten matalamman kaapeliojan hinnan kautta mahdollisesti saatava säästö siirretyssä maa-aineksessa ja tämän kautta saavutettava rahallinen säästö ei tule näkymään suoraan sellaisenaan yhdellekään maakaapelointiin liittyvälle osapuolelle.

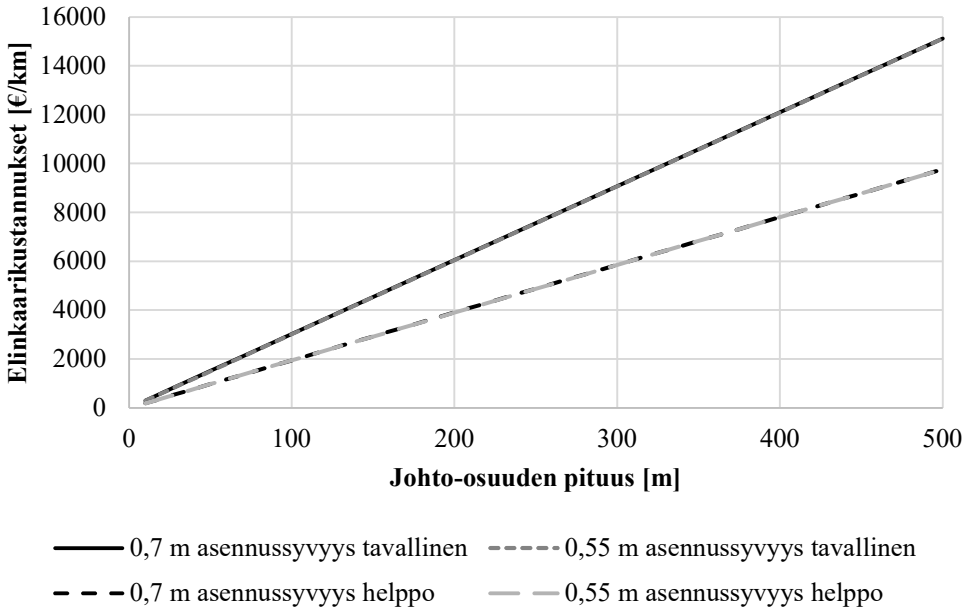
5.2 Kaapelin pituuden ja vikataajuuden vaikutus elinkaarikustannuksiin

Asennettaessa maakaapelia 0,7 m sijaan 0,55 m asennussyvyydelle, tarvitaan kaapelia vähintään asennussyvyyksien eron verran vähemmän sekä ojan alussa että lopussa, jotta kaapeli ylettyy tavoiteltuun asennussyvyyteen. Maakaapeleihin ei tehdä asennettaessa tiukkoja kulmia, johtuen maakaapeleiden taivutussäteistä, kaapelin saavuttaessa tavoitellun asennussyvyyden ja lähtiessä kulkemaan kaapeliojan pohjaa pitkin. Todellisuudessa kaapeliojien alku on loppu ovat tätä loivempia, jotta kaapeleille ilmoitetut taivutussäteet toteutuvat, mutta laskennan helpottamiseksi tehdään yksinkertaistus, että kaapeli tekee ojaan laskeutuessaan 90° kulman ja lähtee kulkemaan suoraan kaapeliojan pohjaa pitkin. Asennussyvyyksien vaihtuessa kaapeliojassa tarvitaan siis 0,3 m vähemmän maakaapelia.

Vikataajuus riippuu kaapelin pituudesta, joten laskettaessa 0,55 m asennussyvyyden elinkaarikustannuksia käytetään kaapelin pituutena 0,3 m lyhyempää kaapelia kuin 0,7 mm asennussyvyydellä laskettaessa. Tällä tavalla saadaan huomioitua suurin mahdollinen vikataajuudesta johtuva vaikutus asennussyvyyksien elinkaarikustannuksissa. Vikataajuutena käytetään Energiateollisuuden vuoden 2019 keskeytystilastosta [Energiateollisuus 2019] saatavaa maakaapelien suunnittelemattomien keskeytysten vikataajuutta 1,94 [kpl/100 km,a], joka muokataan kunkin käytetyn kaapelin pituuden mukaiseksi, esimerkiksi 0,5 km kaapelin vikataajuutena käytetään 0,0097 [kpl/a]. Vikataajuus asennussyvyyksien välillä muuttuisi varmasti, mikäli tarkastelussa olisi esimerkiksi ero 0,1 m ja 10 m asennussyvyyksissä, sillä jo pelkästään routa voisi nostaa 0,1 m asennetun kaapelin maan pinnalle aiheuttaen sen helpomman vahingoittumisen, eikä oikeastaan ole tavanomaisia kaivuita, jossa kaivinkone kaivaa 10 m syvyyteen. Tarkastelussa on kuitenkin niin sanotun normaalin kaivuusyvyyden alueella olevat 0,7 m ja 0,55 m,

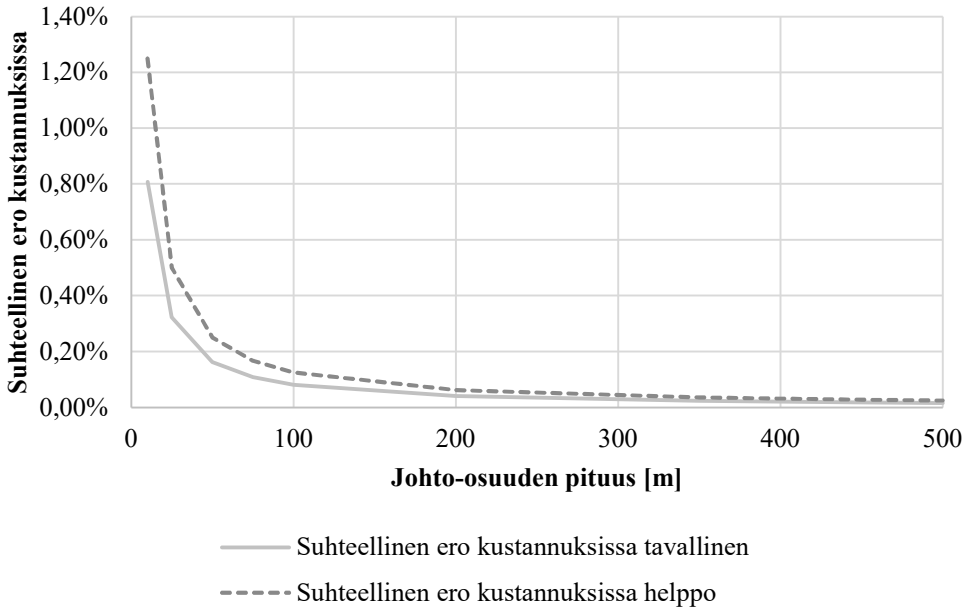
jolloin kaapeleiden asennussyvyyksien ollessa 0,15 m etäisyydellä toisistaan voidaan katsoa vikataajuuden olevan käytännössä sama ja rippuvan pelkästään käytetyn kaapelin pituudesta.

Kaapelin pituuden ja sitä kautta kaapelin vikataajuuden muutokset kaapelin elinkaarikustannuksiin kaapelin asennussyvyyden muuttuessa ovat suoraan sanoen mitättömät. Kuva 5.3 on muodostettu Case 1 lähtöarvoja käyttäen eri asennussyvyyksille ja ympäristöolosuhdeluokille, laskennassa on huomioitu luvun alussa mainittu 0,3 m muutos maakaapelin pituudessa ja sen vaikutukset kaapelin vikataajuuteen asennussyvyyden muuttuessa.



Kuva 5.3 Maakaapelin elinkaarikustannukset kahdella eri asennussyvyydellä ja ympäristöolosuhdeluokalla. 0,55 m asennussyvyyksiin on huomioitu 0,3 m lyhyempi maakaapeli sekä tästä johtuva muutos vikataajuudessa. Molempien asennussyvyyksien ympäristolosuhdeluokkana on käytetty samaa Energiaviraston [Energiavirasto 2021e] ympäristöolosuhdeluokkaa maakaapelioja – helppo olosuhde tai maakaapelioja – tavallinen olosuhde.

Saman ympäristolosuhdeluokan kuvaajat ovat lähes päällekkäisiä, kaapelin muuttuneen pituuden tuomaa eroa elinkaarikustannuksiin on mahdoton havaita paljaalla silmällä kummassakaan ympäristolosuhdeluokassa. Tulkintaa helpottamaan luodaan kuva 5.4, jossa verrataan kummankin asennussyvyyden ympäristöolosuhteen elinkaarikustannusten erotusta alkuperäiseen 0,7 m asennussyvyyden elinkaarikustannukseen.



Kuva 5.4 Suhteellinen ero elinkaarikustannuksissa 0,7 m ja 0,55 m asennussyvyyksien välillä ympäristöolosuhdeluokkien mukaisesti. Kuvaajat on muodostettu kuvan 5.2 kuvaajien perusteella vertaamalla asennussyvyyksien elinkaarikustannusten eroa alkuperäiseen 0,7 m elinkaarikustannukseen jokaisella johto-osuudella.

Kuvasta 5.4 voidaan nähdä, että kaapelin pituuden muutoksesta saatava suhteellinen hyöty pienenee johto-osuuden pituuden kasvaessa. Mikäli suurin osa kaapelointitöistä sijoittuisi 10-50 m johto-osuuksien välille, olisi matalamman kaapeliojan tuoma hyöty noin 0,4 % ja 1,2 % välillä helpon ympäristolosuhdeluokan tapauksessa, ja 0,35 % ja 0,8 % välillä tavallisen ympäristöolosuhdeluokan tapauksessa. Todennäköisesti suurin osa kaapelointitöistä, ainakin jakeluverkkoyhtiöiden tapauksessa, sijoittuu tätä suuremmille johto-osuuksien pituuksille. Esimerkiksi suuren kiven löytyminen kaapeloitavalta reitiltä aiheuttaa helposti tämän suuruisen kustannuserän, varsinkin jos kaapeloitava matka on yli 100 metriä ja kierrettäviä kiviä löytyy useita. Koska asennussyvyyden muutoksesta johtuva käytettävän kaapelin pituuden pieneminen ja sen vaikutus vikataajuuteen ei tuo tämän suurempia säästöjä, voidaan kyseiset ilmiöt jättää huomiotta sillä nämä säästöt hukkuvat ns. kohinaan ja maakaapelointityömaiden muut muuttujat voivat helposti haudata alleen lyhyemmästä maakaapelin pituudesta tulevan säästön kustannuksissa matalampaan asennussyvyyteen siirryttäessä.

6 TAPAUSTARKASTELUT

Tässä luvussa hyödynnetään luvuissa 4 ja 5 johdettuja yhtälöitä kahteen tapaustarkasteluun 0,7 m ja 0,55 m asennussyvyyksillä. Tapaukset eivät ole todellisia tilanteita minkään jakeluverkkoyhtiön verkosta, vaan yksinkertaistettuja esimerkkejä sisältäen erilaisia asennusolosuhteita ja lähtötietoja.

Kunkin tapauksen lähtötiedot löytyvät luvun alusta ja molemmat esimerkit eroavat toisistaan asennusolosuhteiden, kaapeleiden pituuden ja yksittäisen kaapelin syöttämän kuorman osalta. Viankorjauskustannusten ja kaivuukustannusten määrittelyyn on käytetty Energiaviraston yksikköhintoja vuosille 2022-2023 [Energiavirasto 2021d] sekä tähän liittyviä määrityksiä [Energiavirasto 2021e], jolloin tarkastelussa ei huomioida jakeluverkkoyhtiön ja tämän urakoitsijoiden erikseen keskenään sopimia verkonrakennus tai viankorjaushintoja. Vikataajuutena käytetään kummassakin tapauksessa Energiateollisuuden keskeytystilastosta [Energiateollisuus 2019] saatavaa maakaapelien suunnittelemattomien keskeytysten vikataajuutta 1,94 [kpl/100 km,a].

6.1 Maakaapelit haja-asutusalueella (Tapaus 1)

Ensimmäisessä tapauksessa maakaapelit sijaitsevat haja-asutusalueella metsän reunassa ja kaikki kaapelit lähtevät samasta jakokaapista. Kaapelit syöttävät yhteensä viittä samansuuruista asiakasliittymää, ja liittymät aiheuttavat verkkoon jatkuvan 40 kW kuorman, jokainen liittymä kuluttaa tasaisesti 8 kW, kaikki alueen asiakkaat ovat omakotitaloja. Maakaapeleiden kokonaispituus on 200 m. Kaapeleiden käyttöikä on 50 vuotta. Kaapelien vikataajuus on 1,94 [kpl/100 km,a]. Vian korjaus aiheuttaa yksittäiselle asiakkaalle keskimäärin 3 h katkon sähkönjakeluun ja vaatii keskimäärin 5 m kaivuuta. Kyseessä on haja-asutusalue, joten oletetaan tehon vuotuiseksi muutokseksi 1 % etätöiden lisääntyessä ja ihmisten ollessa vähemmän sidottuja kaupunkeihin. Korkotasoksi valitaan 6.

Kaapelit sijaitsevat haja-asutusalueella metsän reunassa, joten ympäristöolosuhdeluokaksi, eli K_{kaivu} arvoksi, valitaan maakaapeliojan helppo olosuhde 11 400 €/km [Energiavirasto 2021d]. Tapauksissa käytettyjen pienjännitekaapelien tyypillä ei ole väliä sillä kaapelin pienellä

pituuden muutoksella ei ole elinkaarikustannuksiin merkittävää vaikutusta aliluvun 5.2 perusteella. Tapauksen 1 lähtötiedot on koottu taulukkoon 6.1.

Taulukko 6.1 Maakaapelit haja-asutusalueella (Tapaus 1) lähtötiedot

Tapauksen 1 lähtötiedot			
Liittymien määrä		[kpl]	5
Liittymien verkkoon aiheuttama jatkuva kuorma	P	[kW]	40
Yksittäisen liittymän keskiteho	ΔP_j	[kW]	8
Maakaapelien kokonaispituus	l_{oja}	[km]	0,2
Vikojen määrä vuodessa, per km	f	[kpl/km, a]	0,0194
Vian aiheuttama keskeytysaika	t_{hij}	[h/kpl]	3
Yksittäisen vian korjauksen vaatima ojapituus	$l_{korjausoja}$	[m]	5
Maakaapeliojan kaivuuhinta	K_{kaivu}	[€/km]	11400
Tarkasteluaika	t	[a]	50
Kuormituksen vuosittainen kasvu	r	[%/a]	1
Korkotaso	p	[%]	6
Keskeytystehon haitta-arvo	a_j	[€/kW]	1,91
Keskeytysenergian haitta-arvo	b_j	[€/kWh]	19,1

Aiempien lukujen perusteella maakaapelien elinkaarikustannusten tarkastelussa ainoastaan maakaapelin kaivuukustannuksella K_{kaivu} on väliä elinkaarikustannusten kannalta. Mikäli 0,55 m asennussyvyyden ja 0,7 m asennussyvyyden kaivuukustannukset ovat samat, eli molempien K_{kaivu} on 11 400 €/km, ovat asennussyvyyksien elinkaarikustannukset samat.

Kaivuukustannus todellisuudessa on 0,55 m asennussyvyydelle pienempi kuin 0,7 m asennussyvyydelle. Energiaviraston ympäristöolosuhdeluokkiin sisältyy kaivuun lisäksi työmaan valmistelua, mekaanista suojausta, maadoitusjohtimen asennusta, hyllyasennusta, massanvaihtoa, tiivistyksiä ja kaivuu itsessäänkin sisältää useat eri kaivuutavat, päällysteet ja jälkityöt massoineen ja tiivistyksineen. [Energiavirasto 2021e] Edellä mainitun vuoksi helpon kaapeliojan hinnasta ei voi suoraan vähentää tiettyä osuutta maakaapelin pienempään asennussyvyyteen vedoten, sillä helpon kaapeliojan hinnassa on komponentteja johon kaivuusyvyys ei vaikuta. Ympäristöolosuhdeluokkien määritelmien perusteella voi kuitenkin sanoa, varsinkin helpon kaapeliojan tapauksessa, että noin 50 – 75 % helpon olosuhteen maakaapeliojan hinnasta muodostuu itse kaivuusta ja asioista, johon asennussyvyys vaikuttaa, kuten täytöistä ja massanvaihdosta.

Valitaan helpon kaapeliojan hinnaksi 0,55 m asennussyvyydelle 9700 €/km. Tämä kustannus on muodostettu ottamalla 75 % helpon kaivuuolosuhteen hinnasta 11 400 €/km, ja sitten poistamalla siitä tarkasteltavien asennussyvyyksien suhde eli 21,5 %. Lopuksi kustannuksiin on lisätty 25 % helpon ympäristöolosuhdeluokan hinnasta niitä komponentteja varten, johon asennussyvyys ei vaikuta, ja lopuksi luku on pyöristetty ylöspäin, sillä kyseessä on arvio. Tapaus 1 on laskettu auki työn ensimmäisessä liitteessä (liite 1). Laskennan tulokset ovat taulukossa 6.2.

Taulukko 6.2 Maakaapelit haja-asutusalueella (Tapaus 1) elinkaarikustannukset

			0,7 m asennussyvyys	0,55 m asennussyvyys	Kustannusten ero [€]	Kustannusten ero [%]
Investointikustannukset	K_{inv}	[€]	2280	1940	340	14,9
Häviökustannukset	$K_{häv}$	[€]	-	-	-	-
Keskeytyskustannukset	K_{kesk}	[€]	34	34	0	0,0
Kunnossapitokustannukset	K_{kun}	[€]	11	9	1,6	14,9
Kokonaiskustannukset	K_{kok}	[€]	**2325**	**1983**	**342**	**14,7**

Tapauksen 1 määrittelyjen perusteella 0,55 m asennussyvyys toisi 50 vuoden pitoajalla säästöjä noin 340 € eli noin 14,7 % säästön normaalista 0,7 m asennussyvyydestä. Säästö johtuu yksinomaan investointikustannuksista, ja siinä 0,55 m asennussyvyydelle määritellystä 0,7 m asennussyvyyttä halvemmasta helpon kaapeliojan hinnasta.

6.2 Maakaapelit asemakaava-alueella (Tapaus 2)

Toisessa tapauksessa maakaapelit sijaitsevat asemakaava-alueella tien vieressä ja kaikki lähtevät jälleen samasta jakokaapista. Kaapelit syöttävät yhteensä kymmentä samansuuruista asiakasliittymää, ja liittymät aiheuttavat verkkoon jatkuvat 74 kW kuorman. Jokainen liittymä kuluttaa tasaisesti 7,4 kW. Maakaapeleiden kokonaispituus on 600 m. Kaapeleiden käyttöikä on 50 vuotta. Kaapelien vikataajuus on 1,94 [kpl/100 km,a]. Vian korjaus aiheuttaa yksittäiselle asiakkaalle keskimäärin 2 h katkon sähkönjakeluun ja vaatii keskimäärin 4 m kaivuuta. Kyseessä on asemakaava-alue, joten oletetaan tehon vuotuiseksi muutokseksi 2 % sähköautoilun ja maalämmön kasvavan suosion vuoksi. Korkotasoksi valitaan 6.

Kaapelit sijaitsevat asemakaava-alueella, joten ympäristöolosuhdeluokaksi valitaan maakaapeliojan tavallinen olosuhde 22 100 €/km [Energiavirasto 2021d]. Tapauksen 2 lähtötiedot on koottu taulukkoon 6.3.

Taulukko 6.3 Maakaapelit asemakaava-alueella (Tapaus 2) lähtötiedot

Tapauksen 2 lähtötiedot			
Liittymien määrä		[kpl]	10
Liittymien verkkoon aiheuttama jatkuva kuorma	P	[kW]	74
Yksittäisen liittymän keskiteho	ΔP_j	[kW]	7,4
Maakaapelien kokonaispituus	l_{oja}	[km]	0,6
Vikojen määrä vuodessa, per km	f	[kpl/km, a]	0,0194
Vian aiheuttama keskeytysaika	t_{hij}	[h/kpl]	2
Yksittäisen vian korjauksen vaatima ojapituus	$l_{korjausoja}$	[m]	4
Maakaapeliojan kaivuuhinta	K_{kaivu}	[€/km]	22100
Tarkasteluaika	t	[a]	50
Kuormituksen vuosittainen kasvu	r	[%/a]	2
Korkotaso	p	[%]	6
Keskeytystehon haitta-arvo	a_j	[€/kW]	1,91
Keskeytysenergian haitta-arvo	b_j	[€/kWh]	19,1

Kuten tapauksessa 1, on tapauksen 2 merkittävin tekijä maakaapeliojan ympäristöolosuhdeluokka. Asemakaava-alueilla pinnoitteet ovat yleisesti asfalttia, eli tavallisen maakaapeliojan hinnasta suuri osa muodostuu kaivuun ulkopuolisista komponenteista, kuten pinnoitteista, jälkitöistä ja suojauksista sekä työmaan valmisteluista. Tämän vuoksi 0,55 m asennussyvyydelle tapauksessa 2 on huomattavasti tapausta 1 hankalampaa muodostaa kustannusta kaapeliojalle. Ympäristöolosuhdeluokkien määritelmien perusteella voi kuitenkin sanoa, että noin 30 – 50 % tavallisen olosuhteen maakaapeliojan hinnasta muodostuu itse kaivuusta ja asioista, johon asennussyvyys vaikuttaa, kuten täytöistä ja massanvaihdosta. Laskentaa varten valitaan, että asennussyvyys vaikuttaa 50 % kaapeliojan hinnasta tavallisen ympäristöolosuhdeluokan tapauksessa.

Valitaan tavallisen kaapeliojan kustannukseksi 0,55 m asennussyvyydelle 19700 €/km. Tämä kustannus on muodostettu ottamalla 50 % helpon kaivuuolosuhteen hinnasta 22 100 €/km, ja sitten poistamalla siitä tarkasteltavien asennussyvyyksien suhde eli 21,5 %. Lopuksi kustannukseen on lisätty 50 % tavallisen ympäristöolosuhdeluokan hinnasta niitä komponentteja varten, johon asennussyvyys ei vaikuta.

Asfaltin alle asemakaava-alueella asennetun maakaapelin vikaantumisriski on hiekkatien tai ojan pientareen alle sijoitetun kaapelin riskiä pienempi siksi, että asfalttia kaivaakseen on kaivajan täytynyt tehdä ainakin jotain ennakkovalmisteluja, ja ennakkovalmisteluihin kuuluu

kaivuualueen maanalaisten rakenteiden selvittäminen ennen kaivuun aloittamista. Kirjallisuudesta ei kuitenkaan löytynyt Energiateollisuuden keskeytystilastoa [Energiateollisuus 2019] vastaavaa lähdettä asfaltin alle asennetun maakaapelin vikaantumisherkkyydelle, joten laskennassa tapauksessa 2 on käytetty samaa vikaantumistodennäköisyyttä kuin tapauksessa 1.

Tapaus 2 on laskettu auki samalla tavalla kuin tapaus 1, mutta käyttäen aliluvun 6.2 lähtötietoja. Tapausta 2 ei ole laskettu erikseen auki liitteisiin. Tapauksen 2 tulokset löytyvät taulukosta 6.4.

Taulukko 6.4 Maakaapelit asemakaava-alueella (Tapaus 2) elinkaarikustannukset

			0,7 m asennussyvyys	0,55 m asennussyvyys	Kustannusten ero [€]	Kustannusten ero [%]
Investointikustannukset	K_{inv}	[€]	13260	11820	1440	10,9
Häviökustannukset	$K_{häv}$	[€]	-	-	-	-
Keskeytyskustannukset	K_{kesk}	[€]	111	111	0	0,0
Kunnossapitokustannukset	K_{huo}	[€]	51	45,9	5,6	10,9
Kokonaiskustannukset	K_{kok}	[€]	**13422**	**11977**	1446	**10,8**

Tapauksen 2 määrittelyjen perusteella 0,55 m asennussyvyys toisi 50 vuoden pitoajalla säästöjä noin 1440 € eli noin 10 % säästön normaalista 0,7 m asennussyvyydestä. Säästö johtuu yksinomaan investointikustannuksista, ja siinä 0,55 m asennussyvyydelle määritellystä 0,7 m asennussyvyyttä halvemmasta helpon kaapeliojan hinnasta.

6.3 Tapaustarkastelun tulokset

Tapausten 1 ja 2 perusteella pienjännitemaakaapelin elinkaarikustannukset ovat täysin riippuvaisia kaapelin investointikustannuksista ja siitä, mihin matalamman asennussyvyyden ympäristöolosuhdeluokan kustannus sijoittuu. Kummassakin tapauksessa matalamman kaapeliojan ympäristöolosuhdeluokan kustannusta laskettiin noin 15 %, mikä näkyi lähes kokonaan helpon maakaapeliojan tapauksessa 1 loppukustannuksissa eron 0,7 m ja 0,55 m asennussyvyyksien elinkaarikustannuksissa ollessa 14,7 %. Tavallisen ojan tapauksessa 15 % ojakustannusten pieneneminen toi 10,8 % säästön, mistä voi päätellä, että kaapelin ympäristöolosuhdeluokan vaikeutuessa yhä pienempi osa kaapelin alkuinvestoinnista saavutettavasta säästöstä näkyy kaapeliojan elinkaarikustannuksissa. Pienjännitemaakaapelin tyypillä ei ole ollut väliä laskennassa eikä sitä huomioitu investointikustannuksissa. Elinkaarikustannukset määrittyvät täysin alkuinvestoinnin mukaan, jolloin maansiirtotyön hinnalla ja sen maansiirtotyönonnistumisella on suurin vaikutus maakaapeliasennuksen elinkaarikustannuksiin.

7 YHTEENVETO

Työn tarkoitus oli selvittää maakaapelin asennussyvyyden vaikutuksia maakaapelin kustannustehokkuuteen ja sähköturvallisuuteen. Näiden selvittäminen osoittautui haasteelliseksi asiaan liittyvien liikesalaisuuksien, kuten maakaapelointiurakoiden tarkan hinnan, ja tiedonsaantiongelmien, kuten Suomessa tapahtuneiden sähkötapaturmien lukumäärän ja tyypin vuoksi.

Maakaapeliasennuksen elinkaarikustannuksiin vaikuttavat maakaapelin alkuinvestointi, kunnossapitokustannukset sekä maakaapelin pitoajan keskeytyskustannukset. Matalammalle asennettu maakaapeli on syvemmälle asennettua kaapelia halvempaa asentaa pienemmän ojankaivuukustannuksen vuoksi. Tarkkaa summaa tai prosenttiosuutta maakaapelin asennussyvyyden vaikutukselle kaapelointityön kustannuksista on mahdoton tämän työn osalta selvittää kaapelointityöhön liittyvien muiden muuttujien, kuten maan alta löytyvän muun infrastruktuurin, työn luonteen ja maankuoren alta löytyvien kivien ja esteiden vuoksi. Tämänkaltainen tarkastelu vaatisi tilastotietoa useilta verkkoyhtiöiltä, urakoitsijayrityksiltä ja kaivuu-urakoijilta, johon ei työn suoritushetken ja käytettävien resurssien osalta kirjoittajalla ollut pääsyä.

Työn tapausesimerkeissä käytettyjen kunnossapitokustannusten perusteella maakaapelivian korjauskustannuksessa ei ole suurta eroa matalamman ja syvemmän asennussyvyyden välillä kunkin vian korjaamiseksi kaivettavan erittäin pienen ojan vuoksi. Kunnossapitokustannuksissa saatava säästö näkyy moninkertaisena kaapelin investointikustannuksissa.

Maakaapelivaurion riski ei muutu merkittävästi, mikäli muutos asennussyvyydessä on maltillinen, sillä kyseessä on yhä maanalainen rakenne, joka on suojattu suojaputkella tai varoittavalla suojanauhalla. Maakaapelivauriot johtuvat kaivajan huolimattomuudesta, ohjeiden ja standardien noudattamattomuudesta sekä alkuvalmistelujen laiminlyönnistä. Työssä tarkasteltu 0,15 m muutos maakaapelin asennussyvyydessä ei ole ratkaiseva pelastamaan tai vaarantamaan kaapelia edellä mainituissa tapauksissa, sillä huolimaton kaivaja osuu käytännössä yhtä helposti 0,7 m kuin 0,55 m asennettuun kaapeliin varsinkin helpon tai tavallisen ympäristöolosuhdeluokan alueella.

Vertailtujen maiden turvallisuusvaatimukset maakaapeloinnin osalta ovat hyvin samankaltaiset. Suurimpana erona maiden välillä käytetyn maakaapeleiden asennussyvyyden lisäksi on se,

että Ruotsissa pienjännitekaapelit asennetaan asiakkaiden tonteilla ainakin suurimpien jakeluverkkoyhtiöiden toimesta asiakkaan urakoitsijan ennalta asentamaan ja peittämään putkeen. Ruotsin maakaapelointia koskevaa standardia ei päivitetä viiden vuoden välein kuten Suomen vastaavaa standardia, tämän diplomityön valmistuessa sen uusin versio on vuodelta 2008.

Perustuen saatavilla oleviin tilastoihin Suomen ja Ruotsin välillä ei ole merkittävää eroa ammattihenkilöille tai maallikoille tapahtuneiden sähkötapaturmien lukumäärissä. Maakaapeleiden asennussyvyydestä johtuvaa eroa maiden sähkötapaturmissa ei voi määrittää työssä tarkasteltujen tilastojen perusteella. Suomen sähkötapaturmista julkisesti saatavilla oleva tilastotieto on liian epätarkkaa eikä tapaturman aiheuttajaa tai tapaturman hetkellä tapahtunutta toimintaa ole julkiseen tilastoon määritelty, toisin kuin Ruotsin Elsäkerhetsverketin julkaisuissa. Suomen vastaavia tietoja olisi ollut saatavilla Tukesille tehtävän maksullisen tietopyynnön kautta, mutta kyseisen selvitystyön kustannus ylitti tähän diplomityön varatun budjetin.

LÄHTEET

ABB TTT-käsikirja. 2000. Luku 19: Sähköjohtojen mitoittaminen. [verkkoaineisto]. [viitattu 3.3.2021]. Saatavissa: http://www.oamk.fi/~kurki/automaatio-labrat/TTT/19_1_S%84hk%94johtojen%20mitoittaminen.pdf

Caruna. 2021. Carunan vuosiraportti 2020. [verkkoaineisto]. [viitattu 23.3.2021]. Saatavissa: https://www.caruna.fi/caruna/vuosiraportti2020

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011a. Sähköverkot I Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. 2. painos. Helsinki: Gaudeamus Oy. 520 s. ISBN 978-951-672-360-3.

Elovaara, J & Haarla, L. 2011b. Sähköverkot II Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Gaudeamus Oy. 551 s. ISBN 978-951-672-363-4.

Elsäkerhetsverket. 2013. Kartläggning av elinstallatörer och yrkesmän.[verkkoaineisto]. [viitattu 27.11.2022]. Saatavissa: https://www.elsakerhetsverket.se/globalassets/publikationer/rapporter/elsak_rapport_kartlaggning_var_elinstallatorer_elektriker_arbetar_2013.pdf

Elsäkerhetsverket. 2018. Elolyckor 2017 Rapport. [verkkoaineisto]. [viitattu 10.4.2021]. Saatavissa: https://www.elsakerhetsverket.se/om-oss/vi-arbetar-med/elolyckor/Elolycksfalls-rapporter/

Elsäkerhetsverket. 2022. Elolyckor 2021 Rapport. [verkkoaineisto]. [viitattu 10.4.2021]. Saatavissa: https://www.elsakerhetsverket.se/om-oss/vi-arbetar-med/elolyckor/Elolycksfalls-rapporter/

Elsäkerhetsverket. 2022a. Människör med auktorisation i Sverige. [sähköpostivastaus Joni-Aleksi Oinoselle]. [viitattu 6.12.2022]. Elsäkerhetsverket

Energiamarkkinavirasto 963/002/2011. Määräys sähköverkkotoiminnan tunnusluvuista ja niiden julkaisemisesta. [määräys] Saatavissa: https://www.finlex.fi/fi/viranomaiset/normi/500013/38418

Energiateollisuus. 2016. Sähköverkkojen rakenne. [verkkoaineisto]. [viitattu 1.6.2020.] Saatavissa: https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/sahkoverkot

Energiateollisuus. 2019. Keskeytystilasto 2019. [verkkoaineisto]. [viitattu 5.12.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/4972/Sahkon_keskeytystilasto_2019.pdf

Energiavirasto. 2021a. Jakeluverkonhaltijoiden sähköverkkoliiketoiminnan tilinpäätöstietojen yhteenveto tilikaudelta 2019. [verkkoaineisto]. [viitattu 28.11.2021]. Saatavilla: https://energiavirasto.fi/verkkotoiminnan-julkaisut

Energiavirasto. 2021b. Sähköverkkotoiminnan tekniset tunnusluvut 2019 (excel). [verkkoaineisto]. [viitattu 25.3.2021]. Saatavilla: https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12766832/Valvontamenetelm%C3%A4t-s%C3%A4hk%C3%B6njakelu-2016-2023.pdf/72eac45f-4fe0-6b0a-d5f7-e89ee97b89fc/Valvontamenetelm%C3%A4t-s%C3%A4hk%C3%B6njakelu-2016-2023.pdf

Energiavirasto. 2021c. "Valvontamenetelmät neljännellä 1.1.2016 – 31.12.2019 ja viidennellä 1.1.2020 – 31.12.2023 valvontajaksolla". [verkkoaineisto]. [viitattu 12.5.2022]. Saatavilla: https://energiavirasto.fi/hinnoittelun-valvonta

Energiavirasto. 2021d. ''Sähköverkon yksikköhinnat 2022-2023 (excel)''. [verkkoaineisto]. [viitattu 24.11.2022]. Saatavilla: https://energiavirasto.fi/hinnoittelun-valvonta

Energiavirasto. 2021e. ''Sähkö- ja maakaasuverkon verkkokomponenttien määritykset''. [verkkoaineisto]. [viitattu 24.11.2022]. Saatavilla: https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12857808/verkkokomponenttien+m%C3%A4%C3%A4rityk-set_fi.pdf/db7880ae-1f8e-66e0-5784-9c3e4bfed319/verkkokomponent-tien+m%C3%A4%C3%A4ritykset_fi.pdf?t=1553604589000

Energimarknadsinspektionen. 2018. Network price regulation. [verkkoaineisto]. [viitattu 10.1.2021]. Saatavissa: https://ei.se/en/In-English/electricity/network-price-regulation/

Energimarknadinspektionen. 2020. Tekniska uppgifter - elnät. [verkkoaineisto]. [viitattu 17.4.2021]. Saatavissa: https://ei.se/om-oss/statistik-och-oppna-data/tekniska-uppgifter---elnat

Energimarknadinspektionen. 2021a. Särskilda rapporten regionnät – teknisk data. [verkkoaineisto]. [viitattu 28.11.2021]. Saatavissa: https://www.ei.se/om-oss/statistik-och-oppna-data/tekniska-uppgifter---elnat

Energimarknadinspektionen. 2021b. Särskilda rapporten lokalnät – teknisk data. [verkkoaineisto]. [viitattu 28.11.2021]. Saatavissa: https://www.ei.se/om-oss/statistik-och-oppna-data/tekniska-uppgifter---elnat

Fingrid. 2020. Suomen sähköjärjestelmä. [verkkoaineisto]. [viitattu 23.5.2021]. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/

Konttinen, M. 2017. Maakaapeloinnin asennustekniikat. Kandidaatintyö. LUT School of Energy Systems, Sähkötekniikka. Lappeenranta. 47 s.

Lakervi, E. & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. 3. painos. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press Oy Yliopistokustannus, HYY Yhtymä. 295 s. ISBN 978-951-672-359-7.

Lehtinen, M. Nurmi, P. & Rämö, T. 1998. Suomen kallioperä: 3000 vuosimiljoonaa. Helsinki: Suomen Geologinen Seura ry. 375 s. ISBN 952-90-9260-1

Maanmittauslaitos, 2022. Maastotietokanta. [verkkoaineisto]. [viitattu 1.10.2022]. Saatavissa: https://asiointi.maanmittauslaitos.fi/karttapaikka/tiedostopalvelu/maastotietokanta

Pesu, J. 2010. Routanousukokeen kehittäminen. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta, Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. Espoo. 70 s.

Prysmian Group. 2018. Energia-, teollisuus- ja talonrakennuskaapelit. [verkkoaineisto]. [viitattu 7.12.2022]. Saatavissa: https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Energialuettelo_2018_lowres.pdf

REKA-kaapeli 2022. AXMK 4x120 S tuotedatalehti. [verkkoaineisto]. [viitattu 1.10.2022]. Saatavissa: https://www.reka.fi/tuoteryhma/axmk/

SETI. 2022. Tieto sähköalan ammattihenkilöiden lukumäärästä päättötyötä varten. 29.11.2022. [sähköpostivastaus Joni-Aleksi Oinoselle]. [viitattu 6.12.2022]. Henkilö- ja yritysarviointi SETI Oy

SFS 4680. 2014. Energiakaapelit. Voima- ja asennuskaapeleiden tyyppimerkinnät. 4. painos. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry. 17 s.

SFS 6000-8-814. 2022. Pienjännitesähköasennukset. Osa 8-814: Täydentävät vaatimukset. Kaapelien asentaminen maahan tai veteen. 3. painos. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry. 9 s.

Suomen ympäristökeskus. 2021. Roudan syvyys. [verkkoaineisto]. [viitattu 10.6.2021]. Saatavissa: http://wwwi3.ymparisto.fi/i3/paasivu/FIN/Routa/Routa.htm

Svensk Standard 424 14 37. 2008. Kabelförläggning i mark. Underground installation of cables. 6. Painos. SEK TK 20. 16 s.

Tilastokeskus. 2022. Liitetaulukko 6. Kuluttajahintaindeksi 2005=100. [verkkoaineisto]. [viitattu 24.11.2022]. Saatavissa: https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__khi/statfin_khi_pxt_11xf.px/

Trafikverket. 2021. Tjäldjup. [verkkoaineisto]. [viitattu 10.6.2021]. Saatavissa: https://tjaldjup.trafikverket.se/

Tukes. 2021b. VARO-rekisteri. [verkkoaineisto]. [viitattu 10.4.2021]. Saatavissa: https://varo.tukes.fi/

Tukes. 2022. Sähköpalot ja -tapaturmat. [verkkoaineisto]. [viitattu 8.12.2021]. Saatavissa: https://tukes.fi/onnettomuudet/yhteenvedot-onnettomuuksista-toimialoittain/sahkotapaturmat-ja-sahkopalot

Verkostosuositus RK 1:16. 2016. Maakaapeliverkon rakentamisen vaatimukset 0,4–45 kV. [verkkoaineisto]. [viitattu 1.6.2020]. Helsinki: Energiateollisuus ry. 42 s.

Liite 1. Tapauksen 1 laskenta

0,7 m Investointikustannukset yhtälön 4.2 avulla

$$K_{\text{inv}}(t) = l_{oja} \cdot K_{\text{kaivu}} = 0{,}2 \cdot 11400 = \mathbf{2280} \quad (4.2)$$

0,7 m Häviökustannukset 0

0,7 m Keskeytyskustannukset yhtälöjen 4.7 ja 4.9 – 4.11 avulla

$$K_0 = \sum f_i\left[a_j + b_j\left(t_{hij}\right)t_{hij}\right]\Delta P_j = 0{,}00388 * (1{,}91 + 19{,}1 * 3) * 8 = 1{,}837878 \quad (4.7)$$

$$\psi_k = \frac{1 + \frac{r}{100}}{1 + \frac{p}{100}} = \frac{1 + \frac{1}{100}}{1 + \frac{6}{100}} = 0{,}95283 \quad (4.11)$$

$$\kappa_k = \psi_k \frac{\psi_k^t - 1}{\psi_k - 1} = 0{,}95283 \frac{0{,}95283^{50} - 1}{0{,}95283 - 1} = 18{,}39646 \quad (4.10)$$

$$K_{kesk}(t) = \kappa_k K_0 = 18{,}39646 * 1{,}837878 = \mathbf{33{,}81045} \quad (4.9)$$

0,7 m Kunnossapitokustannukset yhtälöstä 4.12

$$K_{\text{kun}}(t) = l_{korjausoja} \cdot K_{korjaus} \cdot f \cdot t = 0{,}0005 * 11400 * 0{,}00388 * 50 = \mathbf{11{,}058} \quad (4.12)$$

0,7 m Kokonaiskustannukset yhtälöstä 4.13

$$K_{kok}(t) = K_{inv}(t) + K_{häv}(t) + K_{kesk}(t) + K_{kun}(t) = \mathbf{2314{,}032} \quad (4.13)$$

0,55 m Investointikustannukset yhtälön 4.2 avulla

$$K_{\text{inv}}(t) = l_{oja} \cdot K_{\text{kaivu}} = 0{,}2 \cdot 9700 = \mathbf{1940} \quad (4.2)$$

0,55 m Häviökustannukset 0

0,55 m Keskeytyskustannukset yhtälöjen 4.7 ja 4.9 – 4.11 avulla

$$K_0 = \sum f_i\left[a_j + b_j\left(t_{hij}\right)t_{hij}\right]\Delta P_j = 0{,}00388 * (1{,}91 + 19{,}1 * 3) * 8 = 1{,}837878 \quad (4.7)$$

$$\psi_k = \frac{1 + \frac{r}{100}}{1 + \frac{p}{100}} = \frac{1 + \frac{1}{100}}{1 + \frac{6}{100}} = 0{,}95283 \quad (4.11)$$

$$\kappa_k = \psi_k \frac{\psi_k^t - 1}{\psi_k - 1} = 0{,}95283 \frac{0{,}95283^{50} - 1}{0{,}95283 - 1} = 18{,}39646 \quad (4.10)$$

$$K_{kesk}(t) = \kappa_k K_0 = 18{,}39646 * 1{,}837878 = \mathbf{33{,}81045} \quad (4.9)$$

0,55 m Kunnossapitokustannukset yhtälöstä 4.12

$$K_{\text{kun}}(t) = l_{korjausoja} \cdot K_{korjaus} \cdot f \cdot t = 0{,}0005 * 9700 * 0{,}00388 * 50 = \mathbf{9{,}409} \quad (4.12)$$

0,55 m Kokonaiskustannukset yhtälöstä 4.13

$$K_{kok}(t) = K_{inv}(t) + K_{häv}(t) + K_{kesk}(t) + K_{kun}(t) = \mathbf{1973{,}999} \quad (4.13)$$