

SAVONIA

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIKAN JA LIIKENTEEN ALA

KAPELOIDUN KESKIJÄNNITEVER- KON KUORMITETTAVUUSSELVITYS KAIVOSYMPÄRISTÖSSÄ

TEKIJÄ Kalle Karvinen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä Kalle Karvinen			
Työn nimi Kaapeloidun keskijänniteverkon kuormitettavuus selvitys kaivosympäristössä			
Päiväys	11.04.2024	Sivumäärä/Liitteet	67/18
Toimeksiantaja Yara Suomi Oy			
Tiivistelmä Opinnäytetyössä tutkitaan keskijänniteverkon kuormituksia ja kuormitettavuuksia nykyisillä kaapeloinneilla Yara Suomi Oy:n Siilinjärven tehtaiden kaivosalueella. Kuormitettavuus selvityksen osa-alueita ovat kaapeleiden rakenteet ja asennustavat, kaapelissa syntyvät tehohäviöt sekä ympäristön vaikutukset kuormitettavuuteen. Työssä käsitellään koko kaivosalueen keskijänniteverkkoa. Työssä perehdyttiin kaivosalueen keskijänniteverkon rakenteeseen hyödyntäen yleiskaaviota, jonka avulla selvitettiin kaapeleiden tyypit, poikkipinta-alat sekä pituudet. Kaapeleiden asennustavat selvitettiin kaapelikartan ja asiantuntijoiden avulla sekä silmämääräisesti kaapelikellareista. Keskijänniteverkosta selvitettiin kaapeleiden suojaustavat, asennussyvyudet sekä muut läheiset kaapelit. Kuormitukset selvitettiin Valmet DNA:n historiankeruusta sekä mittauksilla tehoanalyysointilla. Historiankeruun kuormituksia tarkasteltiin vuoden mittaiselta ajanjaksolta ja mittaukset toteutettiin useamman päivän ajalta tehtaiden ollessa käynnissä. Selvitettyjen tietojen pohjalta kuormitettavuudet selvitettiin kansallisen SFS 5636 -standardin kuormitettavuusien korjauskertoimilla. Opinnäytetyön aikana kaivosalueella ilmeni useampi kaapelin asennustapa, joiden kuormitettavuutta ei SFS 5636 -standardin korjauskertoimilla voinut laskea. Kyseisten kaapeleiden kuormitettavuudet selvitettiin kansainvälisen IEC 60287 -standardin esittämällä yhtälöllä. Kansallinen SFS 5636 -standardi huomioi kuormitettavuuslaskelmissa kaapeleiden rakenteet, asennustavat ja ympäristöolosuhteet. Kansainvälinen IEC 60287 -standardi huomioi kuormitettavuuslaskelmissa lämpötilaerot johtimien ja ympäristön välillä perustuen kaapelissa syntyviin häviöihin sekä lämpöresistansseihin. Kuormitettavuuslaskelmissa perehdyttiin kaapeleiden teknisiin ominaisuuksiin, asennustapojen ja ympäristön vaikutuksiin kuormitettavuudessa. Työssä selvitettiin jokaisen keskijännitekaapelin kuormitettavuuteen vaikuttavat rakenneominaisuudet, kaapeleiden asennusolosuhteista syntyvät häviöt sekä asennusympäristön vaikutukset kuormitettavuuteen. Työn tuloksena jokaiselle kaapeliyhteydelle selvitettiin kuormitettavuusraja, josta ilmenee kuinka paljon kuormitusta voidaan nostaa nykyisellä kaapeloinnilla. Kaapeleista saaduista tiedoista, nykyisistä kuormituksista, kuormitettavuuksista sekä vapaista kapasiteeteista laadittiin taulukko, josta kuormitettavuus selvityksen tuloksia voidaan tarkastella. Taulukko tulee työn toimeksiantajan Yara Suomi Oy:n Siilinjärven tehtaiden käyttöön.			
Avainsanat keskijännitekaapeli, keskijänniteverkko, kuormitettavuus			

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Electrical and Automation Engineering	
Author Kalle Karvinen	
Title of Thesis Loadability study of a cabled medium voltage network in a mining environment	
Date 11.04.2024	Pages/Appendices 67/18
Client Organisation Yara Suomi Oy	
<p>Abstract</p> <p>The thesis investigates the loads and load capacities of the medium voltage network in the mining area of Yara Suomi Oy's Siilinjärvi plants. The sub-areas of the load capacity study covers cable structures and installation methods and their effects on loads, power losses in the cables, and environmental impacts on load capacity. The work deals with the medium voltage network of the mining area.</p> <p>The structure of the medium voltage network in the mining area was examined using a general diagram of medium voltage network to identify cable types, cross-sectional areas, and lengths of cables. The cable installation methods were determined using cable maps, expert consultation, and visual inspection of cable rooms. The protection methods, installation depths, and other nearby cables were investigated for the medium voltage network. The loads were determined using the historical collection from Valmet DNA and by measurements with a power analyzer. The load data from historical collection covered a one-year period, and measurements were taken over several days while the factories were running.</p> <p>Based on the data obtained, the load capacities were determined using the correction factors for load capacities of the national Standard SFS 5636. During the thesis work, several cable installation methods were found in the mining area, for which the load capacity could not be calculated using the correction factors of the SFS 5636 standard. The load capacities of these cables were determined using the equations presented in the international standard IEC 60287.</p> <p>The national standard SFS 5636 takes into account cable structures, installation methods and environmental conditions into account in the load capacity calculations. The international standard IEC 60287 observes the temperature differences between the conductors and the environment in the load capacity calculations, based on the losses in the cable and thermal resistances. The load capacity calculations examined the technical properties of cables, the effects of installation methods, and the environment on load capacity. The study investigated the structural characteristics affecting the load capacity of each medium voltage cable, losses arising from installation conditions, and the effects of the installation environment on load capacity.</p> <p>As a result of the study, a load capacity limit was determined for each cable connection, indicating how much load can be increased with the existing cabling. A table was created based on the information about the cables, the current loads, the load capacities, and the available capacities, allowing for the examination of the results of the load capacity study. The table will be used by Siilinjärvi plants of Yara Suomi Oy, the client of the work.</p>	
<p>Keywords</p> <p>medium voltage cable, medium voltage network, current-carrying capacity</p>	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	YARA.....	8
2.1	Yara International ASA	8
2.2	Yara Suomi Oy.....	8
2.3	Yara Suomi Oy, Siilinjärven toimipaikka	8
3	KESKIJÄNNITEVERKKO	9
3.1	keskijänniteverkon kuvaus	9
3.2	Yaran kaivoksen keskijänniteverkko	9
4	KESKIJÄNNITEKAAPELIT JA RAKENNE.....	12
4.1	Keskijännitekaapelin määritelmä	12
4.2	Keskijännitekaapelin rakenne.....	12
4.2.1	Johdin.....	12
4.2.2	Johdinsuoja	13
4.2.3	Johdineristys	13
4.2.4	Hohtosuoja	13
4.2.5	Kosketussuoja	14
4.2.6	Ulkoiset suojakerrokset	14
5	KAIVOSALUEELLA ESIINTYVÄT KESKIJÄNNITEKAAPELIT JA NIIDEN RAKENTEET	15
5.1	Kaivosalueen kaapelit ja ilmajohdot.....	15
5.2	AHXCМК.....	15
5.3	AHXAMK.....	16
5.4	HXCМК.....	17
5.5	APYAKMM.....	18
5.6	Päällystetty keskijänniteavojohto.....	19
5.7	Al -alumiinijohdin	19
6	KESKIJÄNNITEKAAPELIN KUORMITETTAVUUS.....	21
6.1	Kuormitettavuuden selvittäminen	21
6.2	Häviöt kaapelissa	22
6.2.1	Johdinhäviöt.....	22
6.2.2	Kosketussuojan ja vaipan häviöt	22
6.2.3	Dielektriset häviöt.....	23

6.3	Kaapelin hätäkuormitettavuus.....	23
7	KUORMITETTAVUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	24
7.1	Asennustapojen vaikutukset kuormitettavuuteen.....	24
7.2	Kaapelin kuormitettavuus maahan asennettaessa	24
7.2.1	Kaapelin suojaus maassa ja muiden kaapeleiden läheisyys	24
7.2.2	Kaapelin asennussyvyys	26
7.2.3	Maan lämpöresistiivisyys	26
7.2.4	Maan lämpötila	27
7.3	Kaapelin kuormitettavuus ilmaan asennettaessa.....	27
7.3.1	Kolmijohdinkaapelit.....	28
7.3.2	Yksijohdinkaapelit.....	29
7.3.3	Ympäröivän ilman lämpötila	30
7.4	Standardista SFS 5636 poikkeavat asennustavat	30
7.4.1	Kaapeleiden suojaustavat raskaissa tienalituksissa	30
7.4.2	Kaapelin asennustapa kallion sisällä	31
8	KAAPELIN KUORMITETTAVUUDEN LASKEMINEN.....	32
8.1	Kuormitettavuuden laskumenetelmä	32
8.2	Kuormitettavuuslaskelmissa käytetty menetelmä.....	32
8.3	Esimerkkilaskelma 1	33
8.4	Esimerkkilaskelma 2	33
8.5	Esimerkkilaskelma 3	34
9	KAAPELIN KUORMITETTAVUUS IEC 60287 -STANDARDIN MUKAISESTI	36
9.1	Kuormitettavuuden laskumenettely	36
9.2	Johtimen lämpötilannousu ympäristöön nähden	36
9.3	Kaapelissa syntyvät tehohäviöt	37
9.3.1	Johdinhäviöt.....	37
9.3.2	Pintavaikutusilmiö (virranahto)	38
9.3.3	Lähivaikutusilmiö	39
9.4	Dielektriset häviöt	40
9.5	Kosketussuojan häviöt.....	41
9.5.1	Kiertävien virtojen häviökerroin	41
9.5.2	Pyörrevirtahäviöiden kerroin	43

9.6	Lämpöresistanssit	43
9.6.1	Johtimen ja eristyksen välinen lämpöresistanssi	43
9.6.2	Vaipan ja armeerauksen välinen lämpöresistanssi	43
9.6.3	Ulkovaipan lämpöresistanssi	44
9.6.4	Kaapelin ulkoinen lämpöresistanssi	44
10	YHTEENVETO.....	46
	LÄHDELUETTELO.....	48
	LIITE 1: SFS 5636 STANDARDIN LASKENNOISSA KÄYTETYT KUORMITETTAVUUSARVOT JA KORJAUSKERTOIMET.....	50
	LIITE 2: KUORMITETTAVUUSLASKELMAT IEC 60287 -STANDARDIN MUKAISESTI.....	56
	 KUVALUETTELO	
	KUVA 1. Mallinnus kaivosalueen keskijänniteverkon rakenteesta	10
	KUVA 2. Valmet DNA -kuvaaja mittaushistoriasta	11
	KUVA 3. Yksilankainen johdin ja useammasta langasta kerrattu johdin	12
	KUVA 4. AHXCMK-WTC-keskijännitekaapelin ja AHXCMK-HF-keskijännitekaapelin rakennekuvat (Muokattu lähteestä: Reka Kaapeli Oy, 2023)	15
	KUVA 5. AHXAMK-keskijännitekaapelin rakennekuva (Muokattu lähteestä: Reka Kaapeli Oy, 2023)	16
	KUVA 6. HXCMK-keskijännitekaapelin rakennekuva (Muokattu lähteestä: Reka Kaapeli Oy, 2023)	17
	KUVA 7. APYAKMM-kaapelin rakennekuva (Nokia Kaapeli, 1983)	18
	KUVA 8. PAS-avojohdon rakennekuva (TF Kable 2010, 93)	19
	KUVA 9. Alumiinijohtimen rakennekuva (Prysmian, 2023)	20
	KUVA 10. Kaapelin kuormitettavuuteen vaikuttavia tekijöitä	24
	KUVA 11. Peilisymmetrisesti kolmioon asennetut kaapelit	29
	KUVA 12. Tasoon asennetut tasoon vaiheet vierekkäin	29
	KUVA 13. Mallinnus raskaiden tienalituksien asennuksista teräs- ja muoviputkien yhdistelmällä.....	31
	KUVA 14. Kaapelin asennustapa kallion sisällä.....	31

1 JOHDANTO

Teollisuuden keskijänniteverkossa siirretään suuria tehoja tuotantoprosessien tarpeiden mukaan. Tällaisen keskijänniteverkon rakentamisen lähtökohtina on sähkönjakelun luotettavuus, käyttövarmuus ja varautuminen tuotannon laajentumiseen tulevaisuudessa. Opinnäytetyössä perehdytään keskijänniteverkon kaapeleiden kuormitettavuuksiin vaikuttaviin tekijöihin, joita hyödynnetään tutkiessa Yara Siilinjärven kaivosalueen keskijänniteverkon kaapeleiden kuormitettavuutta.

Opinnäytteen toimeksiantajana on Yara Suomi Oy ja aiheena on ”Kaapeloidun keskijänniteverkon kuormitettavuusselvitys kaivosympäristössä”. Aihe perustuu toimeksiantajan tarpeelle saada kaivosalueen keskijänniteverkon nykyisistä kuormituksista ja kuormitettavuuksista ajantasainen näkemys. Opinnäytetyö rajattiin keskijännitekojeistojen kaapeleihin, kaapeleiden asennustapoihin sekä kaapeleiden kuormitukseen, joten itse keskijännitekojeistojen komponenttiselvityksiin tässä työssä ei perehdytä.

Työssä selvitetään kaivosalueen ja louhosalueen jokaisen keskijännitekojeistoista lähtevän kaapelin maksimikuormitukset sekä niiden kuormitettavuudet, jotka kootaan kojeistoittain yhteen taulukkoon. Maksimikuormitukset selvitetään Valmet DNA automaatiojärjestelmästä, joka tallentaa mittaustietoa historiaan, suojarleiden hetkellisistä mittaustiedoista sekä Fluke 435-II-sähkönlaatu- ja energia-analysaattorin avulla. Kuormitettavuudet selvitetään kaapeleiden asennustavoista muodostuneiden korjauskertoimien avulla. Kaapeleiden asennustavat selvitetään kaivosympäristössä kaapelikartan avulla sekä silmämääräisesti havainnoiden alueella.

Opinnäytetyön tulokset on selvitetty kaivosalueen toimintojen ollessa käynnissä, joten ne ovat osaluonteiltaan ajantasaiset. Jokaisen keskijännitekojeistojen lähdöt on koottu taulukkoon, joihin on selvitetty kaapeleiden tyypit, sijainnit sekä tehot. Selvityksien perusteella on laskettu jokaisen kaapelin kuormitusreservi ja tehoreservi.

2 YARA

2.1 Yara International ASA

Yara International ASA on Norjassa perustettu nykyisin maailmanlaajuinen yhtiö, joka valmistaa pääasiassa kivennäislannoitteita, teollisuuskemikaaleja ja ympäristönsuojelutuotteita. Yritys toimii globaalisti yli 60 maassa työllistäen noin 17 500 työntekijää. Yhtiön toiminta alkoi vuonna 1905 nimellä Norsk Hydro. (Yara lyhyesti, 2017.)

2.2 Yara Suomi Oy

Yara Suomi Oy on norjalaisen Yara International ASA:n Suomessa toimiva tytäryhtiö. Yara Suomi Oy:n päätuotteita ovat lannoitteet, teollisuuskemikaalit sekä ympäristönsuojelutuotteet. (Yara Suomi, 2017).

Yara Suomen historia alkaa vuodesta 1920 kun valtion omistama Rikkihappo- ja Superfosfaattitehtaat perustettiin valmistamaan lannoitteita. Tehtaiden nimi muutettiin Rikkihappo Oy:ksi vuonna 1961 ja Kemira Oy:ksi vuonna 1972. Kemira erotti lannoiteliiketoiminnan ja kemianteollisuuden toisistaan 1970-luvun lopulla, jolloin lannoiteliiketoiminta jatkui Kemira Agro Oy:nä. Vuonna 2004 Kemira Agro Oy irtautui emoyhtiöstään ja vaihtoi nimensä Kemira GrowHow:ksi sekä listautui Helsingin pörssiin. Suomen valtio myi oman osuutensa Kemira GrowHow:sta Yaralle vuonna 2007, jolloin siitä tuli Yara International ASA:n tytäryhtiö. (Yara Suomen historia, 2017.)

2.3 Yara Suomi Oy, Siilinjärven toimipaikka

Siilinjärvellä sijaitsee yksi Yaran kolmesta Suomessa toimivasta tuotantolaitoksesta Kokkolan ja Uudenkaupungin lisäksi. Siilinjärven toimipaikalla on kemianteollisuuden tuotantolaitoksia sekä kaivos-toimintaa. Toimipaikalla on neljä tehdasta: fosforihappo-, rikkihappo-, lannoite- ja typpihappotehdas. Tehtailla valmistetaan lannoitteita maatalouden käyttöön, fosforihappoa lannoite- ja rehuteollisuuden käyttöön ja rikkihappoa sekä typpihappoa lannoitteiden raaka-aineiksi. Kaivosalueella toimii EU-alueen ainoa fosfaattikaivos, jossa on käytössä kaksi louhosta, Särkijärven päälouhos ja Jaakonlammen louhos. Kaivoksella sijaitsee myös rikastamo, jossa malmista erotetaan fosfaatti. Tuotannossa sivutuotteina syntyy sivukiveä, kipsiä, biotiittia, fluoripiihappoa sekä pasutetta. Siilinjärvellä on myös oma voimalaitos, josta prosessihöyryä kuljetetaan kaikille tehtaille. Tuotantoprosesseissa syntyvää prosessihöyryä käytetään sähköenergian tuottamiseen kahden höyryturbiinin avulla sekä prosessihöyryä hyödynnetään myös kaukolämpönä Siilinjärven taajamassa. Toimipaikka työllistää tehtaiden ja kaivoksen puolella välittömästi noin neljäsataa henkilöä. (Yara Siilinjärvi, 2018.)

3 KESKIJÄNNITEVERKKO

3.1 keskijänniteverkon kuvaus

Teollisuuden keskijänniteverkko suunnitellaan sähköjakelussa säteittäiseksi, vaikka se on rakennettu monin osin silmukoiduksi. Silmukoidun keskijänniteverkon keskeiseksi rooliksi nousee varayhteydet, jotka voidaan suunnitella saman sähköaseman tai vierekkäisen sähköaseman kautta. (Lakervi & Partanen 2008, 125.) Varayhteydellä voidaan varmistaa sähköjakelun jatkuvuus verkon terveisissä osissa yksittäisissä vikatilanteissa, joka lisää keskijänniteverkon käyttövarmuutta ja suunnittelun vaativuutta (Elovaara & Haarla 2011, 160). Teollisuudessa keskijänniteverkkojen kuormitus on yleensä tasaista, korkeana jatkuvaa kuormitusta, kun taas julkisessa sähköjakelussa kuormituksessa esiintyy kuormitusten ajallista vaihtelua, jossa huippukuormitustilanteet kestävät harvoin pitkään. Teollisuuden keskijänniteverkossa kiskostot, muuntajat sekä kaapelit mitoitetaan käyttöastetta suuremmaksi tulevaisuuden laajentamistarpeet huomioiden. Teollisuusverkossa siirretään suuria tehoja, joiden myötä kaapeleiden poikkipinnat, muuntajien tehot sekä oikosulkuvirrat ovat suuria.

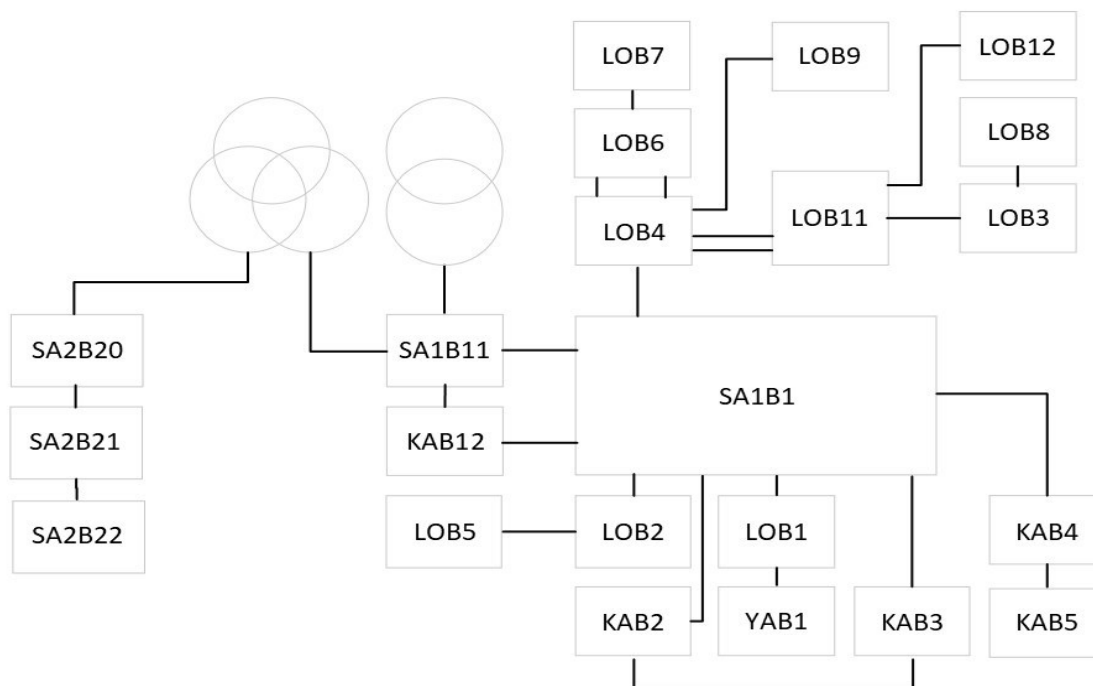
3.2 Yaran kaivoksen keskijänniteverkko

Opinnäytetyössä käsitellään Yara Suomi Oy, Siilinjärven tehtaiden kaivosalueen keskijänniteverkkoa sekä tarkastellaan varasyöttöyhteyksien kuormitettavuutta. Tehtaan ja kaivoksen keskijänniteverkko koostuu kahdesta fyysisesti erillisestä verkosta, joiden päämuuntajien kautta toteutetaan keskijännitejakelu alueillaan. Kaivosalueella on 110/10,5 kilovoltin päämuuntaja sekä 110/21/10,5 kilovoltin päämuuntaja pääsähköaseman kytkinkentällä, jotka ovat liittyneinä 110 kilovoltin yleiseen sähköverkkoon. Kaivosalueen päämuuntajien avulla syötetään kaivosalueen 10 kilovoltin ja 20 kilovoltin keskijännitekojeistoja. Tehtaan ja kaivoksen välillä on varasyöttöyhteys, jonka myötä voidaan siirtää sähköenergiaa toisen tarpeiden mukaisesti poikkeustilanteissa. Molemmat kaivoksen päämuuntajat sijaitsevat kaivoksen kytkinkentällä pääsähköasemien vieressä, joista keskijännitejakelu aloitetaan kummassakin jännitetasossa. Suurin osa keskijännitekaapeleista on maahan kaivettua kaapelia, mutta keskijänniteverkosta löytyy myös ilmajohtoja. Maakaapeloinnin vikataajuus on huomattavasti pienempi verraten ilmajohtoihin, mikä parantaa sähköjakelun käyttövarmuutta kaivosalueen toiminoille. (Elovaara & Haarla 2011, 306.) Ilmajohtoja on rakennettu alueelle, jossa ympäristö ja tiestö muuttuu väliajoin, jolloin ilmajohtoja on helpompi siirtää niille edullisempaan sijoituspaikkaan.

Kaivoksen toiminta on aloitettu 1979, jolloin ensimmäiset keskijänniteverkon kaapelit on asennettu. Paperieristeistä APYAKMM-kaapelia on käytetty toiminnan aloittaessa laajalti ennen muovieristeisten kaapeleiden yleistymistä. Alkuperäisiä APYAKMM-kaapeleita löytyy edelleen kaivosalueelta ja osa on korvattu alumiinijohtimisella PEX-eristeisellä AHXCMK- ja AHXAMK-kaapeleilla. Kaivoksen toiminnan alkaessa keskijänniteverkko on ollut maa-asennukseltaan suppea, sähköaseman ja muutaman laitoksen välillä toimiva jakeluverkko. Louhoksen osalta keskijänniteverkko on toiminut ilmajohtona lähinnä valaistuksia varten. Toiminnan kasvaessa keskijänniteverkko on laajentunut useiden uusien laitoksien sähköntarpeiden myötä ja maakaapelointi yleistynyt louhinnasta aiheutuvien vahinkojen myötä, jossa louhitusta kalliosta irtoavat kivet rikkovat ilmajohtojen rakennetta.

Nykypäivänä kaivosalueen tarpeisiin vastaa 10 kilovoltin ja 20 kilovoltin jakeluverkko. Keskijänniteverkko käsittää päämuuntajan ja jakelumuuntajan välillä olevat kaapelit, kojeistot ja katkaisijat.

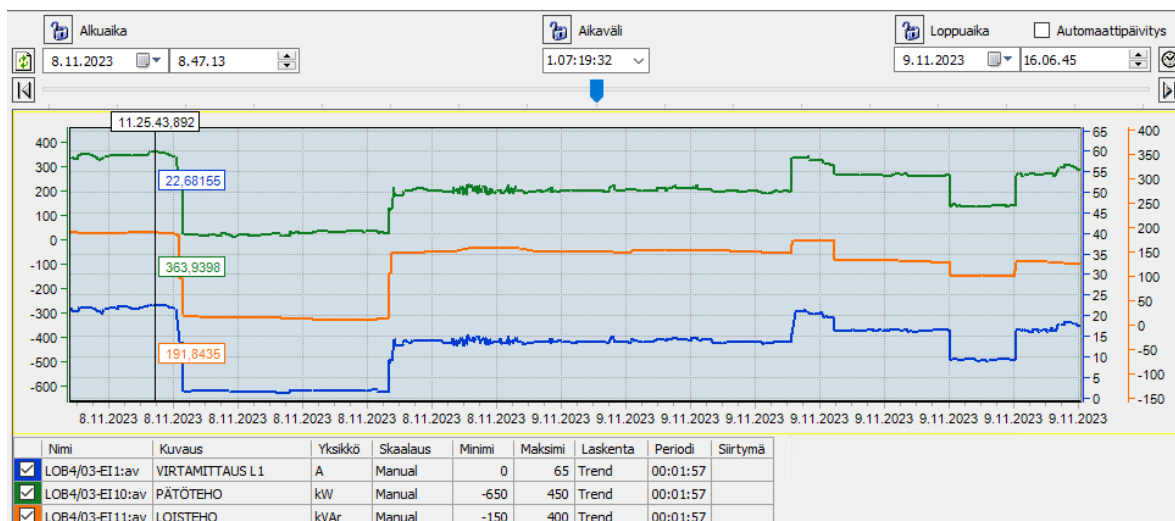
Opinnäytetyö rajattiin keskijännitekojeistoista lähteviin keskijännitekaapeleihin. Kaivosalueella on 22 keskijännitekojeistoa, joissa on noin 70 keskijännitekaapeleiden lähtöä. Selvitettäviä kaapeleita kaivosalueella oli yhteensä yli 35 kilometrin verran. Keskijänniteverkko kaivoksella on rengasverkon kaltainen kriittisimpien laitoksien läheisyydessä ja varasyöttöyhteyksiä löytyy turvaamaan sähkönjakelua alueella. Kaivosalue on noin 15 kilometriä pitkä, joten sähkönjakeluverkko on myös pitkälti säteittäinen.



KUVA 1. Mallinnus kaivosalueen keskijänniteverkon rakenteesta

Kaapeleiden reittejä sekä asennustapoja selvitetiin sähkötilojen kaapelikellareista sekä prosessitiloista, jolloin niitä oli mahdollista havainnoida silmämääräisesti. Maahan asennetuissa kaapeleissa kaapeleiden reitit selvitetiin kaapelikartan ja asiantuntijoiden avustuksella.

Kaapeleiden kuormitukset selvitetiin keskijännitekojeistojen suojarleiden mittaustiedoista sekä Valmet DNA historiakeruusta, joka tallentaa suojarleiden mittaustietoja automaatiojärjestelmään. Huippukuormituksia tarkasteltiin jokaisen lähdön osalta vuoden aikaväliltä trendikaaviolta, joista etsittiin huippukuormitukset skaalausominaisuudella. Jokaisessa keskijännitekojeistossa ei ollut suojarlettä tai historiankeruuta, jolloin kuormitukset mitattiin muuntajan toisiopuoleen kytketystä pienjännitekeskuksesta Fluke 435-II-sähkönlaatu- ja energia-analysaattorin avulla. Näissä tapauksissa kuormitettavuuksien tarkastelussa on mukana muuntajassa syntyvät kuormitushäviöt, jotka ovat tapauskohtaisesti pienet. Mittauksissa huomioitiin kaivosalueen toimintojen normaalit käynnit ja mitausjaksot kestivät useamman päivän ajan, jolla varmistettiin todelliset kuormitushuiput.



KUVA 2. Valmet DNA -kuvaaja mittaushistoriasta

Valmet DNA -automaatiojärjestelmän historiankeruuta hyödynnettiin tarkasteltaessa keskijännitekojeistojen lähtöjen kuormituksia. Automaatiojärjestelmä kerää suojareleeltä mittaustietoja, jotka tallentuvat järjestelmään. Tallentuvia mittaustietoja voidaan tutkia jälkikäteen kuvan 1. mukaisen kuvaajan avulla. Kuvassa 1. on esitetty trendi yhden keskijännitekojeiston lähdöstä. Mittausaika on skaalattu reilun vuorokauden aikajaksolle muutosten visualisoimiseksi. Kuvassa on esitetty virtamittaus (A) sinisellä käyrällä, pätehomittaus (kW) vihreällä käyrällä ja loistehomittaus (kVAr) oranssilla käyrällä. Mittausarvot on skaalattu kuvan selkeyden vuoksi ja huippuarvot on tuotu esille hiusviivan avulla.

4 KESKIJÄNNITEKAAPELIT JA RAKENNE

4.1 Keskijännitekaapelin määritelmä

Keskijännitekaapelilla tarkoitetaan jännitetasoltaan 1–36 kilovoltin johdinryhmää, joka koostuu yhdestä tai useammasta johtimesta. Keskijännitekaapelin käyttöjännite ilmoitetaan muodossa $U_0/U/U_m$, jossa U_0 tarkoittaa johtimen ja maapotentiaalin välistä jännitettä, U tarkoittaa johtimien välistä jännitettä ja U_m tarkoittaa suurinta käyttöjännitettä. Kaivosalueen keskijännitejakelu toimii 10 kilovoltin ja 20 kilovoltin jännitteillä.

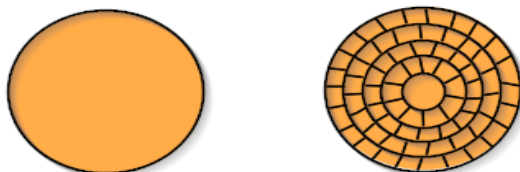
4.2 Keskijännitekaapelin rakenne

Keskijännitekaapelin rakenteeseen kuuluu johtimen ja eristeen lisäksi erilaisia johdinta ja kojeistoja suojaavia rakenneosia. Suojauksessa käytetään johdinsuojia, hohtosuojia sekä kosketussuojia. Rakenteeseen vaikuttavat muun muassa kaapelin käyttöjännite, tehonsiirron tarve sekä asennusolosuhteet ja -ympäristö. Keskijännitejakelussa voidaan siirtää paljon tehoa suurella jännitteellä, jolloin kaapelin tulee olla hyvin eristetty ehkäisten osittaispurkauksista johtuvia läpilyöntejä. Asennusolosuhteissa tulee huomioida mahdolliset korkeat lämpötilat, mekaaniset rasitteet tai maa-asennuksissa ympäröivästä vierusaineesta johtuvat tekijät. (Elovaara & Haarla 2011, 320.)

4.2.1 Johdin

Keskijännitekaapeleiden johdinmateriaalina käytetään yleensä alumiinia tai kuparia. Kupari johdinmateriaalina on kalliimpi, mutta sen resistiivisyys on alumiinia pienempi. Tämän myötä kuparista valmistettu johdin on virranjohtavuudeltaan parempi vaihtoehto. Alumiini johdinmateriaalina on puolestaan kuparia halvempaa sekä massaltaan kevyempää. Alumiinista valmistetun johtimen resistiivisyys on kuparijohdinta suurempi, joten sen virranjohtavuus on kuparijohdinta pienempi. Suuremman resistiivisyyden vuoksi alumiinikaapeleiden poikkipinta-ala on noin 50 % suurempi verraten muihin virranjohtokyvyiltään samanlaisiin kuparikaapeleihin. Muita metalleja tai metalliseoksia voidaan käyttää, jos kaapelilta vaaditaan esimerkiksi mekaanisia lisäsuojauksia (Elovaara & Haarla 2011, 307).

Johtimen rakenne voi koostua yhdestä tai useammasta kerratusta langasta, jolla voidaan vaikuttaa kaapelin liikuteltavuuteen. Johtimet valmistetaan yleensä pyöreään muotoon, jolla voidaan vähentää osittaispurkauksia sekä vaimentaa pintakentänvoimakkuuksia. Johtimen ilmoitettu koko ei tarkoita sen geometrista kokoa, vaan sähköistä poikkipinta-alaa, joka voidaan määritellä resistanssin avulla. Tämän vuoksi johtimen geometrinen kokoa voidaan muokata valsaamalla pitäen kaapelin kuormitettavuus samana. (Anders 1997, 5.)



KUVA 3. Yksilankainen johdin ja useammasta langasta kerrattu johdin

4.2.2 Johdinsuoja

Johdinta tai johtimia suojaa johdinsuoja, joka sijaitsee johtimen pinnalla. Johdinsuoja on puolijohtavasta muovista valmistettu kerros johtimen ja eristyksen välissä. Johdinsuojan käyttötarkoitus on tasoittaa johtimen pinnan epätasaisuuksia sekä pienentää johdinlankojen aiheuttamia kentänvoimakkuushuippuja. Kaapelin oikosulussa tai maasuluissa johdinsuojalla voidaan myös pienentää johtimen lämpörasitusta eristykseen (Elovaara & Haarla 2011, 310).

4.2.3 Johdineristys

Keskijännitekaapeleiden johdineristyksen tehtävä on muodostaa homogeeninen, tasalaatuinen sähkökenttä eristykseen antaen riittävän jännitekestoisuuden kaapelille. Eristyksen avulla voidaan eristää johdin tai johtimet toisistaan. Paljaan ilmajohdon rakenne on yksinkertaisempi kaapeleihin verrattuna ja niiden eristeenä toimii ympäröivä ilma. Eristys sijaitsee johdinsuojan päällä ja tyypillisesti eristyksen materiaalina käytetään erilaisia muoveja.

Kaapelin käyttöjännitteen mukaisesti määritellään johdineristyksen paksuus. Eristyksen pitkäaikaista jännitekestoisuutta voidaan lisätä sen puhtaudella ja eristyspintojen tulisi olla mahdollisimman tasaiset. Liiallinen lämpö ja erityisesti kosteus vanhentaa eristystä ennen aikaisesti mahdollistaen läpilyönin kaapelissa.

Eristysmateriaalilla voidaan vaikuttaa myös kaapelin kuormitettavuuteen. Hyvällä lämmönkestoisuudella, pienellä lämpöresistiivisyydellä ja pienillä dielektrisillä häviöillä kaapelin eriste on termisesti ajateltuna käyttökelpoinen tehonsiirtoon (Anders 1997, 7).

4.2.4 Hohtosuoja

Eristyksen päällä on hohtosuoja, jonka tehtävä on johdinsuojan kanssa tasata sähkökenttää ja estää kentänvoimakkuushuippujen syntyminen. Hohtosuojan materiaalina käytetään johtavaa metallinauhaa tai puolijohtavaa materiaalia, esimerkiksi muovia. Vaihtosähkökaapelissa kentänvoimakkuus on suurin johtimen pinnalla yhtälön 1 mukaisesti,

$$E(r) = \frac{U_0}{r \cdot \ln \frac{r_u}{r_s}} \quad (1)$$

missä,

U_0 = johtimen ja maapotentiaalin välinen jännite (V)

r = johtimen keskipisteestä laskettu etäisyys (mm)

r_u = eristyksen ulkopinnan säde (mm)

r_s = eristyksen sisäpinnan säde (mm)

Kaapelin nimellijännitteen noustessa myös kentänvoimakkuus nousee, jolloin eristyksen paksuutta tai johtimen poikkipinta-alaa tulisi nostaa. Kentänvoimakkuuden noustessa liian korkeaksi eristeen

rasitus kasvaa, joka lisää osittaispurkauksien vaaraa. Kaapelistandardeissa on määritelty kentänvoimakkuuksille sallitut rajat, joka takaa kaapeleiden turvallisen käytön (Elovaara & Haarla 2011, 310).

4.2.5 Kosketussuoja

Kosketussuoja sijaitsee hohtosuojan päällä, joka toimii varaus- ja vikavirtojen kulkutienä sekä häiriösuojana. Kosketussuojan rakenteisiin vaikuttaa kaapelityyppi sekä käyttötarkoitus. Kosketussuojan voi toteuttaa vaihekohtaisesti jokaiselle vaiheelle tai yhteisesti kaikille vaiheille. Toimintaperiaatteen vuoksi kosketussuoja on valmistettu aina metallista ja tyyppillisesti materiaalina käytetään alumiinia tai kuparia. Kaikissa muovieristeisissä keskijännitekaapeleissa ei ole yhtenäistä metallivaippaa, vaan se on voitu korvata metallinauhoilla tai metallilaminaateilla tai näiden yhdistelmällä. Tällaisessa tapauksessa eristeen kosketussuojaus on pelkästään ulkoisen muovivaipan varassa. Metallivaippa puuristetaan yhtenäiseksi kerrokseksi kaapelin ympärille muodostaen kaapelille poikittaisen vesitiiviin kerroksen. Kaapeliin pääsevä vesi ja kosteus heikentää sen jännitekestoisuutta. (Elovaara & Haarla 2011, 310.)

Maakaapeloinneissa kosketussuoja voi olla asennustyyppiltään avoin tai suljettu. Avoin kosketussuojapiiri on yhdestä päästä kytketty, jolloin kosketussuojaan ei muodostu suljettu virtapiiri. Avoimeen kosketussuojaan ei indusoidu virtoja, jonka vuoksi kaapelin kuormitettavuus ei heikkene. Avointa kosketussuojapiirikytkentää täytyisi välttää pitkällä kaapelipituuksilla, sillä kosketussuojaan indusoitava jännite nousee pituuden ja johtimen virran mukaisesti. Indusoitunut jännite voi aiheuttaa läpilyönnin kaapelin ulkovaipassa.

Suljettu kosketussuojapiiri on kahdesta päästä kytketty, jolloin kosketussuojaan syntyy suljettu virtapiiri. Suljetussa kosketussuojapiirissä kosketussuojaan indusoituu kiertäviä virtoja sekä pyörrevirtoja, jotka lämmittävät kaapelia ja täten heikentävät kaapelin kuormitettavuutta. Kuormitettavuuslaskelmissa pyörrevirtahäviöt otetaan huomioon vain, jos kaapelissa on sektorirakenteinen Milliken-johdin.

4.2.6 Ulkoiset suojakerrokset

Ulkoiset suojakerrokset toimivat kaapelin mekaanisina suojina. Keskijännitekaapelissa voidaan käyttää välivaippoja, ulkovaippoja korroosiosuojia sekä armeerauksia riippuen kaapelin käyttötarkoituksesta. Välivaippoja voidaan käyttää muovikaapeleissa kerrattujen johtimien mekaanisina suojina. Ulkovaipat voivat olla metallia, muovia tai kumia, jotka suojaavat kaapelia mekaanisilta rasituksilta sekä korroosiolta.

Armeerausta käytetään meri- ja kaivoskaapeleissa, joissa kaapelin olosuhteet vaativat erityistä mekaanista suojausta. Armeerausmateriaaleina voidaan käyttää sinkittyä terästä tai metalliseoksia. Käyttöolosuhteitten mukaan, kaapelissa voidaan käyttää useampia armeerauskerroksia. Maahan asennetuissa keskijännitekaapeleissa armeerausta ei tarvita, sillä kaapelin vaippa antaa itsessään riittävän suojauksen. (Elovaara & Haarla 2011, 311.)

5 KAIVOSALUEELLA ESIINTYVÄT KESKIJÄNNITEKAAPELIT JA NIIDEN RAKENTEET

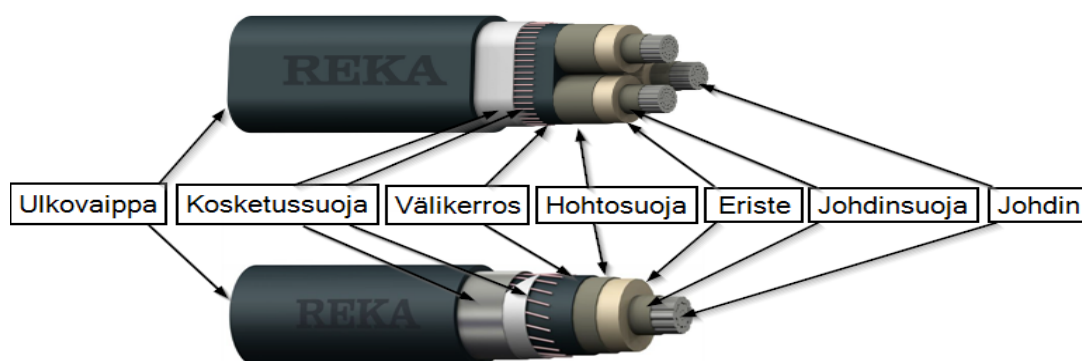
5.1 Kaivosalueen kaapelit ja ilmajohtdot

Kaivosalueella esiintyy maakaapeleita rakennetyypeiltään AHXCMK, AHXAMK, APYAKMM ja HXCMK sekä ilmajohtoja tyypeiltään PAS, 120 Al ja 132 Al.

Suurin osa keskijännitekaapeleista on asennettu maahan, jolla pienennetään sähkönjakelun vikataajuutta. Sähkönjakelu prosessilaitoksille sekä louhosalueelle on toteutettu maakaapelointina. Kaivosalueella ilmajohtoja nähdään paikoissa, joissa ne eivät ole muuttuvan teollisuusympäristön tiellä. Ilmajohtoja on myös sijoitettu paikkoihin, joissa ympäristö ja tiestö muuttuu väliajoin, jolloin ilmajohtoja on helpompi siirtää verraten maakaapelointiin.

5.2 AHXCMK

Kaivosalueella on käytössä AHXCMK-WTC-kaapeleita ja AHXCMK-HF-kaapeleita. AHXCMK-WTC-kaapeleita ja AHXCMK-HF-kaapeleita on käytetty päämuuntajien ja keskijännitekojeistojen välisissä kaapeloinneissa sekä keskijännitekojeistojen ja muuntajien välisissä kaapeloinneissa. Kuvassa 4 on esitetty kolmijohtimisen AHXCMK-WTC-kaapelin ja yksijohtimisen AHXCMK-HF-kaapelin rakennekuvat.



KUVA 4. AHXCMK-WTC-keskijännitekaapelin ja AHXCMK-HF-keskijännitekaapelin rakennekuvat (Muokattu lähteestä: Reka Kaapeli Oy, 2023)

AHXCMK-kaapeli on alumiinijohtiminen keskijännitekaapeli. Kaapelin johtimet koostuvat useista kerattuista alumiiniköysistä. Kaapelin johtimia suojaa puolijohtavasta ristikilloitetusta polyteenistä, eli PEX:stä valmistettu johdinsuoja. Johdinsuojan päällä on eriste, joka kaapelissa on PEX-eristysmuovia. Kaapelin eristyksen päällä on hohtosuoja, joka on valmistettu puolijohtavasta PEX-eristysmuovista. Eristetyt vaihejohtimet ovat kerrattu ja sidottu yhteen. Johdinkertauksen päällä on puolijohdava sidenauha. Sidenauhan päällä on metallinen, kuparilangoista ja vastakierrekuparinauhasta valmistettu kosketussuoja. Kosketussuojan päällä on muovinauha, jonka päällä on vaippa, joka on valmistettu PVC-sekoitteesta. (Reka Kaapeli Oy 2023.)

AHXCMK-WTC-kaapelin merkinnän loppuosa "WTC" tarkoittaa kaapelin johtimien olevan pituussuunnassa vesitiiviitä (SFS 4680 2015, 8). Vesisulkusuojauksen myötä AHXCMK-WTC-kaapelia voidaan käyttää maa-asennuksissa kosteissa olosuhteissa. Kaapelin kaikkien vaihejohtimien ympärille on kerrattu vesitiiveysnauha, joka paisuu veden vaikutuksesta. AHXCMK-HF-kaapelin merkinnän loppuosa "HF" tarkoittaa kaapelin olevan halogeeniton, vähän savuava (SFS 4680 2015, 8). Lisäksi AHXCMK-

HF-kaapelin metallisena kosketussuojana on käytetty kuparilankojen lisäksi polyteenilaminoitua alumiinifoliota.

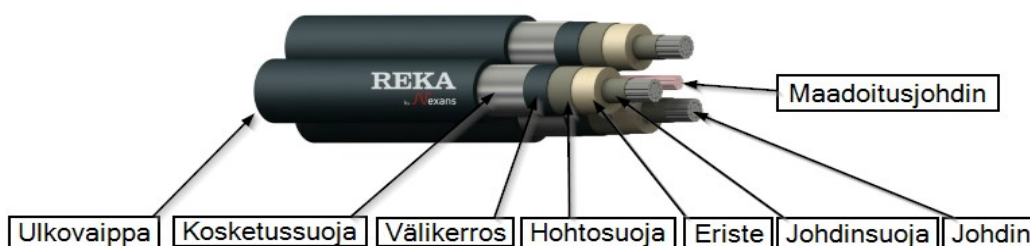
Kaivosalueella AHXCMK-kaapelia on käytetty 500 metriä, josta AHXCMK-WTC-kaapelia on 490 metriä ja AHXCMK-HF-kaapelia on 10 metriä. Taulukossa 1. nähdään suurimmat sallitut kuormitusvirrat PEX-eristeisille kolmijohtimiselle kupari- tai alumiinikaapeleille, jota hyödynnettiin kuormitettavuuslaskelmissa.

TAULUKKO 1. Suurimmat sallitut kuormitusvirrat PEX-eristeisille kolmijohtimisille kupari- tai alumiinikaapeleille (SFS 5636 2017, 50)

Nominal cross-section of conductor	Cu-conductor			Al-conductor		
	Cable laid in ground of 15 °C	Cable laid in ground of 15 °C	Cable laid in air of 25 °C	Cable laid in ground of 15 °C	Cable laid in ground of 15 °C	Cable laid in air of 25 °C
	Conductor temperature 40 °C	Conductor temperature 65 °C	Conductor temperature 90 °C	Conductor temperature 40 °C	Conductor temperature 65 °C	Conductor temperature 90 °C
mm ²	A	A	A	A	A	A
35	105	140	165	80	110	135
50	135	175	205	110	145	160
70	155	210	250	130	175	190
95	185	250	295	160	205	230
120	210	285	340	170	230	265
150	240	325	390	205	260	305
185	265	360	435	215	290	340
240	340	415	515	270	340	400
300	345	470	590	280	380	460

5.3 AHXAMK

Kaivosalueella on käytössä AHXAMK-W-kaapeleita. AHXAMK-W-kaapeleita on käytetty keskijännitekojeistojen välisissä maa-asennuksissa sekä keskijännitekojeistojen ja muuntajien välisissä kaapeloinneissa. Kuvassa 5 on esitetty kolmijohtimisen AHXAMK-W-kaapelin rakennekuva.



KUVA 5. AHXAMK-keskijännitekaapelin rakennekuva (Muokattu lähteestä: Reka Kaapeli Oy, 2023)

AHXAMK-kaapeli on alumiinijohtiminen keskijännitekaapeli. Kaapelin johtimet useista kerratuista alumiiniköysistä. Kaapelin johtimia suojaa puolijohtavasta muovista, PEX:stä valmistettu johdinsuoja. Johdinsuojan päällä on eriste, joka kaapelissa on PEX-eristysmuovia. Kaapelin eristykseen päällä on hohtosuoja, joka on valmistettu puolijohtavasta PEX-eristysmuovista. Hohtosuojan päällä on puolijohtava vesitiivisyssuola. Vesitiivisyssuolan päällä on metallinen, polyteenilaminoitua alumiinifoliosta koostuva kosketussuoja. Polyteenilaminoitu alumiinifolio muodostaa kaapeliin kosteussulun poikittaissuunnassa. Alumiinifolion päällä on musta polyteenimuovista koostuva ulkovaippa.

AHXAMK-W-kaapelin kolme vaipattua vaihejohtinta on kerrattu paljaan kuparisen maadoitusjohtimen ympärille. Kaapelimerkin loppuosa "W" tarkoittaa kaapelin olevan pituus- ja poikittaissuunnassa vesitiivis. (SFS 4680 2015, 8) Vesitiivyyden vuoksi kaapelia voidaan käyttää kosteissa ja märissä asennuksissa.

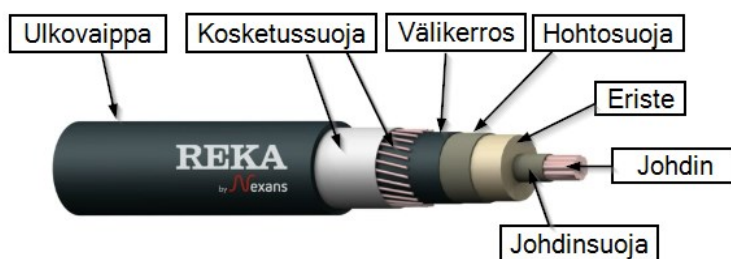
Kaivosalueella AHXAMK-W kaapelia on käytetty noin 17000 metriä. Taulukossa 2. nähdään suurimmat sallitut kuormitusvirrat PEX-eristeisille yksijohtimisille alumiinikaapeleille, jota hyödynnettiin kuormitettavuuslaskelmissa.

TAULUKKO 2. Suurimmat sallitut kuormitusvirrat PEX-eristeisille yksijohtimisille alumiinikaapeleille (SFS 5636 2017, 49)

Nominal cross-section of conductors	Cable laid in ground of 15 °C				Cable laid in ground of 15 °C				Cable laid in air of 25 °C (indoor and outdoor installation)			
	Conductor temperature 40 °C				Conductor temperature 65 °C				Conductor temperature 90 °C			
	Laying formation				Laying formation				Laying formation			
	flat		trefoil		flat		trefoil		flat		trefoil	
	screen circuit		screen circuit		screen circuit		screen circuit		screen circuit		screen circuit	
mm ²	open A	closed A	open A	closed A	open A	closed A	open A	closed A	open A	closed A	open A	closed A
25	90	90	80	80	125	125	110	110	140	135	125	125
35	110	110	100	100	150	150	135	135	175	170	155	155
50	130	125	115	115	175	170	155	155	210	205	195	195
70	165	160	150	150	220	215	205	200	265	255	235	235
95	190	185	170	170	255	250	240	235	320	310	285	280
120	220	210	200	195	295	280	270	265	370	350	330	325
150	245	235	225	220	330	315	305	300	425	395	380	370
185	275	260	255	245	375	350	345	330	485	440	430	425
240	320	300	290	285	435	395	395	385	570	515	505	490
300	360	330	330	320	485	440	445	435	650	580	580	565
400	420	370	390	375	570	500	525	510	790	680	695	680
500	475	420	435	420	645	550	590	570	920	755	800	775
630	530	465	490	470	720	610	665	635	1 040	840	915	880
800	595	500	535	525	805	650	725	695	1 220	950	1 045	1 010
1 000	665	530	595	580	900	700	800	760	1 390	1 060	1 170	1 130
1 200	715	580	635	615	970	740	860	810	1 540	1 160	1 290	1 230

5.4 HXCMK

Kaivosalueella on käytössä HXCMK-kaapeleita, joita on käytetty keskijännitekojeistojen ja muuntajien välisissä lyhyissä kaapeloinneissa. HXCMK-kaapelit on asennettu kaapelihyllyille ilma-asennuksena tasoon. Kuvassa 6 on esitetty yksijohtimisen HXCMK-kaapelin rakennekuva.



KUVA 6. HXCMK-keskijännitekaapelin rakennekuva (Muokattu lähteestä: Reka Kaapeli Oy, 2023)

HXCMK-kaapeli on kuparijohtiminen keskijännitekaapeli. Johdin koostuu useista kerratuista kuparijohtimista. Johtimen päällä on puolijohtava PEX-johdinsuoja. Johdinsuojan päällä on PEX-eristysmuovista valmistettu eriste. Eristeen päällä on puolijohtavasta PEX:stä valmistettu hohtosuoja. Hohtosuojan päällä on puolijohtavasta nauhasta valmistettu välikerros. Välikerroksen päällä on metallinen, kuparilangasta ja vastakierrekuparinauhasta koostuva kosketussuoja. Kosketussuojan päällä on PVC-sekoitteesta koostuva ulkovaippa.

Kaivosalueella HXCMK-kaapelia on käytetty noin 20 metriä. Taulukossa 3. nähdään suurimmat sallitut kuormitusvirrat PEX-eristeisille yksijohtimisille kuparikaapeleille, jota hyödynnettiin kuormitettavuuslaskelmissa.

TAULUKKO 3. Suurimmat sallitut kuormitusvirrat PEX-eristeisille yksijohtimisille kuparikaapeleille (SFS 5636 2017, 50)

Nominal cross-section of conductor	Cable laid in ground of 15 °C				Cable laid in ground of 15 °C				Cable laid in air of 25 °C (indoor and outdoor installation)			
	Conductor temperature 40 °C				Conductor temperature 65 °C				Conductor temperature 90 °C			
	Laying formation				Laying formation				Laying formation			
	flat		trefoil		flat		trefoil		flat		trefoil	
	screen circuit		screen circuit		screen circuit		screen circuit		screen circuit		screen circuit	
mm ²	open A	closed A	open A	closed A	open A	closed A	open A	closed A	open A	closed A	open A	closed A
25	115	115	105	105	155	155	145	145	180	175	160	160
35	145	140	130	130	195	185	175	175	220	215	200	195
50	165	160	150	150	225	220	205	205	265	235	255	250
70	205	200	190	190	280	270	255	255	340	320	300	295
95	245	235	220	220	330	315	295	295	410	380	360	355
120	275	255	250	245	375	345	340	335	470	430	420	410
150	315	285	285	280	425	385	385	380	520	480	480	465
185	350	315	320	315	475	425	435	425	615	535	545	535
240	405	360	370	360	545	485	500	485	725	615	640	620
300	460	390	420	405	620	530	570	545	820	685	730	705
400	530	435	475	460	720	590	645	625	1 000	785	870	835
500	600	475	535	515	810	645	725	695	1 150	870	985	940
630	665	515	595	560	900	700	805	755	1 300	960	1 115	1 035

5.5 APYAKMM

Kaivosalueella on käytössä APYAKMM-kaapeleita, jotka ovat asennettu kaivostoiminnan alkaessa 1970-luvulla. APYAKMM-kaapeleita on asennettu keskijännitekojeistojen välisissä kaapeloinneissa maa-asennuksena. Kuvassa 7 on esitetty APYAKMM-kaapelin rakennekuva.



KUVA 7. APYAKMM-kaapelin rakennekuva (Nokia Kaapeli, 1983)

APYAKMM-kaapeli on alumiinijohtiminen keskijännitekaapeli. Kaapelin johtimet on valmistettu alumiinisista virtajohtimista, eristyksenä on käytetty paperia ja hohtosuojana on käytetty puolijohtavaa paperia. Kyllästysaineena on käytetty valumatonta kyllästysmassaa, vaippa koostuu jokaisen vaihejohtimen ympärille asennetusta alumiinivaipasta, korroosiosuojana toimii muovivaippa ja ulkovaippa, joka koostuu PE-muovista. (Nokia Kaapeli 1983.) Kaapeleita on käytetty keskijännitejake-lussa pääkaapelina ennen muovieristeisten kaapeleiden yleistymistä. APYAKMM-kaapeleiden valmistus on lopetettu vuonna 1987. APYAKMM-kaapeleita on vielä käytössä toimipaikan keskijännitejake-lussa. Kaivosalueella kyseistä kaapelia on käytössä noin 1730 metriä.

Taulukossa 4. nähdään suurimmat sallitut kuormitusvirrat APYAKMM-kaapeleille, jota hyödynnettiin kuormitettavuuslaskelmissa.

TAULUKKO 4. APYAKMM-kaapelin suurimmat sallitut kuormitusvirrat (Nokia Kaapeli 1983)

	3x185	3x240	3x300
ilmassa +25 °C, johdin +65 °C	270 A	315 A	360 A
maassa +15 °C, johdin +65 °C	290 A	335 A	375 A

5.6 Päälystetty keskijänniteavojohto

Kaivosalueella on käytössä päälystettyä keskijänniteavojohtoa, PAS-avojohtoa. Avojohtoja on sijoitettu alueelle, jossa muuttuva teollisuusympäristö ei ole edessä, eikä avojohdon läheisyydessä ole louhintaa, joka lisää riskiä kivistä aiheutuville keskeytyksille. Avojohtoja on myös alueella, jonne varastoidaan malminrikastuksessa syntyvää sivutuotetta, rikastushiekkaa. Maakaapelointi kyseisillä alueilla on todettu vaikeaksi maaperän ja ympäristön muuttuessa, joten ilmajohdot ovat helpommin siirrettävissä tarpeen vaatiessa. Kuvassa 8 on esitetty päälystetyn keskijänniteavojohdon, PAS-avojohdon rakennekuva.



KUVA 8. PAS-avojohdon rakennekuva (TF Kable 2010, 93)

PAS-avojohto on yleisnimitys päälystetyille ilmajohdoille, jota voidaan käyttää keskijännitejakelussa. PAS-avojohdon johtimena toimii monilankainen pyöreä kierretty alumiiniseos, jonka johdin on pulveroitu. Eristeenä avojohdossa toimii säänkestävä PEX-eriste. Eriste johtimien pinnalla vähentää vieresineiden tai viereisen johtimen kosketuksesta aiheuttamia läpilyöntejä sekä sen avulla johtojen vaiheväliä voidaan pienentää. Tämä mahdollistaa kapeamman johtokadun rakentamisen. PAS-johdoissa eristeen avulla voidaan vähentää läpilyöntejä, joka pienentää sähkönjakelun käyttökatoja. Kaivosalueella PAS-avojohtoa on käytetty 2600 metriä. Taulukossa 5. nähdään suurimmat sallitut kuormitusvirrat PAS-avojohdoille, jota hyödynnettiin kuormitettavuuslaskelmissa.

TAULUKKO 5. Suurimmat sallitut kuormitusvirrat PAS-avojohdoille (Sener 1994, 37)

Johdin	Vaiheresistanssi (DC)		Vaihe-reaktanssi	Maakapasitanssi	Käyttökapasitanssi	Suurin sallittu kuormitusvirta	Suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta		Jäähtymisaikavakio
	Rv	Xv					Ik	Ik	
	Ω/km	Ω/km	kA	kA					
	+20 °C 1)	+40 °C 2)	3)	4)	3)	5)	T1-liittimet	T2-liittimet	τ min
PAS 35	0,986	1,065	0,324	0,005	0,011	200	-	3,2	7
PAS 50	0,720	0,778	0,312	0,005	0,012	245	-	4,3	8
PAS 70	0,493	0,533	0,302	0,005	0,012	310	-	6,4	10
PAS 95	0,363	0,392	0,292	0,005	0,013	370	-	8,6	13
PAS 120	0,288	0,311	0,284	0,005	0,013	430	-	11	15
PAS 150	0,236	0,255	0,277	0,005	0,013	485	-	13,5	18
PAS 185	0,188	0,203	0,270	0,005	0,014	560	-	17	20

5.7 Al -alumiinijohdin

Kaivosalueella on käytössä Al -alumiinijohtimia. Alumiinijohtimia käytetään sähköenergianjakelussa siirtolinjoissa. Rakenne koostuu kerratusta alumiinijohtimesta ja johtimen päällä ei ole mitään mekaanista suojausta, kosketussuojausta tai muovieristettä vaan ilma toimii johdon eristeenä. Kuvassa 9 on esitetty alumiinijohtimen rakennekuva.



KUVA 9. Alumiinijohtimen rakennekuva (Prysmian, 2023)

Avojohtoja on sijoitettu alueelle, jossa muuttuva teollisuusympäristö ei ole edessä, eikä avojohdon läheisyydessä ole louhintaa, joka lisää riskiä kivistä aiheutuville keskeytyksille. Maakaapelointi alueella on todettu vaikeaksi maaperän ja ympäristön muuttuessa, joten ilmajohtot ovat helpommin siirrettävissä tarpeen vaatiessa. Al -alumiinijohdinta on myös käytetty tehtaan ja kaivoksen välisen varasyöttöyhteyden johdintyyppinä.

Taulukossa 6. nähdään suurimmat sallitut kuormitusvirrat Al -ilmajohtoille. Kaivosalueella on käytössä alumiinijohtimia noin 9 kilometrin verran.

TAULUKKO 6. Suurimmat sallitut kuormitusvirrat Al -ilmajohtoille (Sener 1994, 36)

Johdin	Vaiheresistanssi (DC)		Vaihe-reaktanssi	Maakepa-sitenssi	Käyttöke-pasitanssi	Suurin sallittu kuormitusvirta	Suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta		Jäähtymisaikavakio
	Rv						Xv	Cm	
	Ω/km	Ω/km	Ω/km	$\mu\text{F}/\text{km}$	$\mu\text{F}/\text{km}$	A			kA
	+20 °C 1)	+40 °C 2)	3)	4)	3)	5)	T1-liittimet	T2-liittimet	min
Al 25	1,16	1,25	0,397	0,0061	0,0092	170	2,1	-	3
Al 40	0,725	0,783	0,382	0,0061	0,0095	230	3,5	-	4
Al 62	0,459	0,496	0,368	0,0061	0,0099	305	5,6	-	6
Al 99	0,288	0,311	0,354	0,0061	0,010	415	8,7	-	8
Al 132	0,218	0,236	0,344	0,0061	0,011	495	11,6	-	10
Al 178	0,162	0,175	0,335	0,0061	0,011	600	15,6	-	13
Al 201	0,143	0,155	0,331	0,0061	0,011	645	17,7	-	15

6 KESKIJÄNNITEKAAPELIN KUORMITETTAVUUS

6.1 Kuormitettavuuden selvittäminen

Kaapelia kuormittaessa johtimissa siirrettävä teho aiheuttaa aina häviöitä. Sähköenergiaa siirrettäessä tämä tarkoittaa tehon muodostavan lämpöenergiaa, joka aiheuttaa kaapelin lämpenemistä. Tehon synnyttämä lämpöenergia siirtyy johtimia pitkin kaapelin rakenteisiin sekä ympäristöön. Liiallinen lämpeneminen lyhentää kaapelin käyttöikää vanhentaen sen eristystä, aiheuttaen vikoja kaapelissa tai laitteissa. Kaapelin kuormitettavuutta tarkasteltaessa on huomioitava kaapelin rakenne sekä asennusolosuhteet, jotka vaikuttavat kaapelin lämpenemiseen eri tavoilla. Kaapelin asennustavasta ja ympäröivästä materiaalista johtuvista tekijöistä saman poikkipinnan kaapelia ei voida kuormittaa samalla virralla.

Kaapelin kuormitettavuuteen vaikuttaa kaapelin rakenne, ympäristön lämpötila, viereisten johtojen lämmittävä vaikutus, maan lämpöresistiivisyys maahan upotetuissa kaapeleissa, asennustavat ja asennussyvyys. Standardeissa ilmoitetut kuormitustaulukot ilmoittavat kuinka suurella virralla kaapelia voidaan yhtäjaksoisesti kuormittaa, ilman kaapelin liiallista lämpenemistä. (Elovaara & Haarla, 2011, 316.) Kaapeleita sijoittaessa on otettava huomioon kaapelin suurimmat käyttölämpötilat sekä kuormitettavuuteen vaikuttavat tekijät.

Kaapelin kuormitettavuuden laskennassa määritellään minkä suuruista virtaa kaapelissa voidaan käyttää. Laskentaa varten täytyy pystyä arvioimaan, paljon kaapelissa syntyy lämpöä ja miten kaapelia ympäröivä materiaali voi vastaanottaa kaapelin lämpenemisen. (Elovaara & Haarla 2011, 316.) Kuormitettavuuksien selvittämiseksi kansainvälisessä IEC-standardissa sekä kansallisessa SFS-standardissa on määritelty korjauskertoimia erilaisille asennustavoille, joiden avulla voidaan laskea kaapelin kuormitettavuus.

Kaapelin termisellä kuormitettavuudella tarkoitetaan, kuinka paljon kaapelissa voidaan siirtää virtaa niin, ettei häviöistä syntyvä lämpötila aiheuta kaapelille vahinkoa. Jännitteen ollessa vakio, vain siirrettävään virtaan voidaan vaikuttaa, jolloin kuormitettavuus voidaan ilmoittaa suurimpana sallittuna kuormitusvirtana. Kuormitusvirta yhdelle vaiheelle voidaan laskea yhtälön 3 mukaisesti siirrettävän tehon avulla.

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (2)$$

josta voidaan laskea virta (I),

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (3)$$

jossa,

I = virta (A)

P = pätöteho (W)

Q = loisteho (Q)

U = pääjännite (V)

$\cos \varphi$ = tehokerroin (pätötehon suhde näennäistehoon)

6.2 Häviöt kaapelissa

Kaapelissa syntyy kuormituksen myötä häviöitä, jotka määräävät kaapelin maksimikuormitettavuuden. Kaapelin lämpöhäviöitä syntyy johtimissa, vaipassa ja armeerausessa, joita kutsutaan virtalämpöhäviöiksi. Kaapelin eristeessä syntyy myös dielektrisiä häviöitä. Kaapelissa syntyvät häviöt muuttuvat lämmöksi nostaan johtimen ja eristeen lämpötilaa. Maahan asennetussa kaapelissa lämpöhäviöt siirtyvät johtumalla eristeen ja suojakerrosten läpi kaapelin pinnalle ja kaapelia ympäröivään materiaaliin. Ilmajohdossa syntyvä lämpö säteilee kaapelia ympäröivään ilmaan. (Elovaara & Haarla 2011, 317.)

Kaapeleissa syntyviä häviöitä on kahdentyyppisiä. Toiset häviöt ovat riippuvaisia kaapelissa kulkevasta virrasta, kun taas toiset ovat riippuvaisia käytettävästä jännitteestä. Johtimessa ja vaipassa tapahtuvat häviöt ovat verrannollisia virtaan. Jänniteriippuvaiset dielektriset häviöt tapahtuvat kaapelin eristeissä.

6.2.1 Johdinhäviöt

Suurin osa kaapelissa syntyvistä häviöistä syntyy kaapelin johtimissa. Johtimissa syntyvät häviöt ovat riippuvaisia virrasta (I) ja resistanssista (R) ja niitä kutsutaan virtalämpöhäviöiksi. Virtalämpöhäviöiden teho eli pätöteho häviöt voidaan kolmivaihejärjestelmässä laskea yhtälön 4 mukaisesti

$$P_h = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (4)$$

Yhtälöstä 4 nähdään, että häviöteho P_h nousee virran neliössä, kun kaapelin resistanssi pysyy samana.

Kaapelin ominaisresistanssit ovat riippuvaisia kaapelin johdinmateriaalista ja poikkipinta-alasta. (Lakervi & Partanen 2008, 34.) Kaapelin poikkipintaa kasvattaessa voidaan kaapelia kuormittaa suuremmalla virralla, mutta virranjohtokyvyn kasvaessa kaapelin jäähtymisominaisuudet eivät kuitenkaan kasva samassa suhteessa.

6.2.2 Kosketussuojan ja vaipan häviöt

Yksivaiheisista kaapeleista kootun kolmivaiheisen kaapelin kuormitettavuuteen vaikuttaa kaapelissa olevan metallivaipan maadoitustapa. Metallivaipan ollessa maadoitettuna molemmista päistään, johtimissa kulkevan vaihtovirran synnyttämä magneettikenttä indusoi kaapelin metalliosaan virran, joka synnyttää kaapelissa ylimääräisiä lämpöhäviöitä ja laskee kaapelin kuormitettavuutta. Jos kaapelin

toinen pää jätetään maadoittamatta, kaapelin lämpöhäviöt pienenevät ja kaapelin kuormitettavuus nousee. (Elovaara & Haarla 2011, 99.)

6.2.3 Dielektriset häviöt

Dielektriset häviöt ovat vaihtojännitekentässä kaapelin eristeessä syntyviä tehohäviöitä, jotka ovat riippuvaisia jännitteestä. Dielektrisiin häviöihin vaikuttaa kaapelin eristemateriaali, joka ei koskaan ole ideaalinen, vaan eristeessäkin on aina johtavuutta.

Häviöt syntyvät vaihtosähkökentän suunnanmuutoksista johtuvan dielektrisen jälkivaikutuksen ja molekyylikitkan vuoksi. Kaapelin eristeelle ominaista on johtavuuden kasvu lämpötilan noustessa, jolloin myös tehohäviöt kasvavat. Dielektriset häviöt ovat vakioitaajuudella ja vakioämpötilassa verrannollisia sähkökentän voimakkuuden neliöön. (Anders 1997, 109.)

Dielektriset häviöt ovat keskijännitekaapeleissa yleensä pieniä, joten niitä ei tarvitse ottaa huomioon. (Simonen 2010, 72).

6.3 Kaapelin hätäkuormitettavuus

Keskijännitekaapelia voidaan kuormittaa verkostosuosituksen SA 5:94:n hätäkuormitettavuuden mukaisesti. Hätäkuormitettavuuden aikana on käytettävä aina tapauskohtaista huolellista harkintaa, koska lyhytkestoinen varayhteyden ylikuormitustilanne voi vaurioittaa kaapelia. Hätäkuormitettavuudessa kaapelin eriste vanhenee ennenaikaisesti, jos kaapelin lämpötila ylittää suurimman sallitun kuormituslämpötilan. Ilmajohdoille ei ole määritelty hätäkuormitettavuuksia.

Verkostosuosituksen SA 5:94 mukaisesti hätäkuormituksen keston raja-arvoina voidaan pitää 50 tunnin jatkuvaa hätäkuormitusta ja enintään 500 tunnin hätäkuormitusta kaapelin koko käyttöiän aikana. (Sener 1994, 7.)

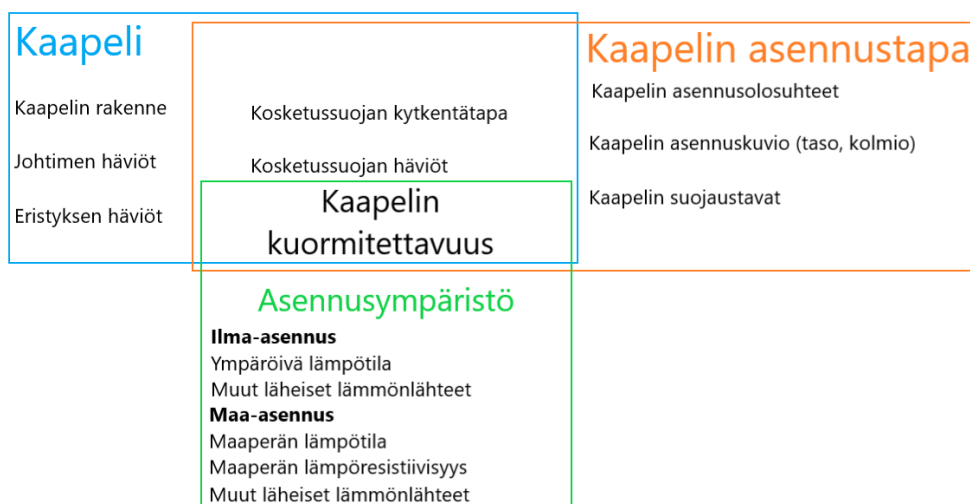
TAULUKKO 7. Kaapelien hätäkuormitettavuuden suhde kaapelin normaaliin maksimikuormitettavuuteen (Sener 1994, 7)

Kaapelityyppi	Johtimen maksimilämpötila hätäkuormituksella (°C)	Hätäkuormitettavuuskertoin	
		Kaapeli ilmassa +25 °C	Kaapeli maassa +15 °C
12-24 kV paperieristeinen	95	1,26	1,20
1-24 kV PEX-eristeinen	130	1,20	1,30

7 KUORMITETTAVUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

7.1 Asennustapojen vaikutukset kuormitettavuuteen

Kaapelin kuormitettavuudessa on otettava huomioon asennustavoista riippuvat korjauskertoimet. Korjauskertoimilla voidaan ilmoittaa kaapelin keskimääräisen kuormituksen suhde huippukuormitukseen. Korjauskertoimet tulee ottaa huomioon kaapelin asennustapojen muuttuessa peruskuormitettavuudesta. Kuvassa 10 on esitetty kaapelin kuormitettavuuteen vaikuttavia tekijöitä.



KUVA 10. Kaapelin kuormitettavuuteen vaikuttavia tekijöitä

Maahan asennetuissa kaapeleissa huomioidaan ympäristön lämpökapasitanssi, jolla kuvataan aikaa kaapelin ja sitä ympäröivän maa-aineksen lämpenemiseen ja jäähtymiseen. Maan yläpuolisissa asennuksissa kaapelit lämpenevät nopeasti, eikä niiden kohdalla kuormituskertoimia huomioida. (Thue 1998, 180.) Kaapelin kuormitettavuuteen vaikuttaa kaapelin rakenteen ja asennusolosuhteiden lisäksi maaperästä syntyvät kuormitusta rajoittavat tekijät.

7.2 Kaapelin kuormitettavuus maahan asennettaessa

Maahan asennetun kaapelin kuormituksia tutkiessa täytyy huomioida kaapelin suojaus maassa sekä muiden kaapeleiden läheisyys, kaapelin asennussyvyys, maan lämpöresistiivisyys ja maan lämpötila. Nämä kaikki tekijät vaikuttavat kaapelin kuormitettavuuteen. Toimipaikalla maahan asennettujen kaapeleiden asennustavat on selvitetty toimipaikan asiantuntijan kanssa AutoCad -ohjelmistoa hyödyntäen.

Standardin SFS 5636 mukaan suurin sallittu johtimen lämpötila maahan asennettuna on +65 °C PEX-eristeisillä kaapeleilla. Kaapeleita asennettaessa maahan perusolosuhteiden voidaan olettaa maan lämpötilan olevan +15 °C, asennussyvyyden olevan 0,7 metriä ja maan lämpöresistiivisyyden olevan 1,0 K·m/W.

7.2.1 Kaapelin suojaus maassa ja muiden kaapeleiden läheisyys

Maahan asennettujen kaapeleiden kuormitettavuuteen vaikuttavat kaapelin suojaus maassa sekä muiden kaapeleiden läheisyys. Kaapelin kuormitettavuus laskee, mitä useampi kolmijohtiminen kaa-

pelit tai yksijohtimisten kaapeliryhmien joukko on samassa kaapeliojassa. Myös viereisten kaapeleiden etäisyydet vaikuttavat kuormitettavuuteen. Kuormitettavuuteen vaikuttaa myös kaapelin asennustapa suoraan maahan tai putkeen.

Taulukosta 8. nähdään korjauskertoimet kolmijohtimisten kaapeleiden tai yksijohtimisten kaapeliryhmien lukumäärän sekä niiden etäisyyksien mukaan. Taulukkoa 8. voidaan käyttää, jos kaapeli on asennettu suoraan maahan ilman suojaputkea.

TAULUKKO 8. Korjauskertoimet kolmijohtimisten kaapeleiden tai yksijohtimisten kaapeliryhmien lukumäärän ja etäisyyksien mukaan suoraan maahan asennettuna (SFS 5636 2017, 51)

Mutual spacing between cables or groups of cables mm	Number of multicore cables or groups of single-core cables beside each other						
	2	3	4	5	6	8	10
0 (touching)	0,79	0,69	0,63	0,58	0,55	0,50	0,46
70	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53
250	0,87	0,79	0,75	0,72	0,69	0,66	0,64

Taulukosta 9. nähdään korjauskertoimet kolmijohtimisten kaapeleiden tai yksijohtimisten kaapeliryhmien lukumäärän sekä niiden etäisyyksien mukaan. Taulukkoa 9. voidaan käyttää, jos kaapeli on asennettu maahan suojaputkeen.

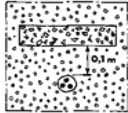
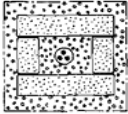

TAULUKKO 9. Korjauskertoimet kolmijohtimisten kaapeleiden tai yksijohtimisten kaapeliryhmien lukumäärän ja etäisyyksien mukaan putkeen asennettuna (SFS 5636 2017, 52)

Mutual spacing between tubes mm	Number of tubes beside each other							
	1	2	3	4	5	6	8	10
0 (touching)	0,80	0,75	0,65	0,60	0,60	0,55	0,55	0,50
70		0,75	0,70	0,65	0,60	0,60	0,55	0,55
250		0,75	0,70	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65

Joissain asennustapauksissa kaapeleita voidaan suojata betoni- tai tiililaatoilla, tiilikivillä tai muovikouruilla. Mikäli suojan ja kaapelin väliin jää ilmaa, voidaan käyttää korjauskertoimia lämpenemisen huomioimiseksi. (Heinhold 1990, 153.) Taulukossa 10. nähdään vuoden 1989 sähkötarkastusmääräyksien korjauskertoimet suojakourujen ja laattojen aiheuttaman kuormitettavuuden huomioimiseksi.

Toimipaikalla kaapelit ovat asennettu sähkötilojen läpivienneissä ja teiden alituksissa putkeen ja muualla maassa muovikouruun. Kaapeleiden kuormitettavuuslaskelmissa on huomioitu kaapelin asennustapojen muutos maassa ja jokaiselle muutokselle on laskettu erilliset kuormitettavuudet. Osa alkuperäisistä kaapeleista on asennettu betonikanaaliin, joiden kuormitettavuuslaskelmissa kanalin vaikutukset on otettu huomioon taulukon 10. mukaisesti.

TAULUKKO 10. Korjauskertoimet kaapelin betoni-, tiililaatta tai muovikouruasennuksissa (Sähkötar-
kastuskeskus 1989, 186)

Suojaustapa	Piirros	Korjauskerroin
Betoni- tai tiililaatta yli 0,1 m kaapelin yläpuolella hyvin tiivistetyssä hiekkamaassa		1,0
Tiilikivet joka puolella kaapelin suo- jana, välit täytetty tiiviisti hiekalla tai betonikouru kaapelin päällä, kourun ja kaapelin välissä tiivis hiekka		0,9
Betoni- tai muovikouru kaapelin päällä, kaapelin ja kourun välinen hiekkatäyte löysä		0,8

7.2.2 Kaapelin asennussyvyys

Keskijännitekaapeleiden asennussyvyys on yleensä vähintään 0,7 metriä maan routimisen vuoksi (Elovaara & Haarla 2011, 99). Kaapelin asennussyvyys katsotaan maan pinnasta kolmijohdinkaapeliryhmän kaapeleiden keskikohtaan tai yksijohdinkaapelin keskikohtaan. Asennussyvyyden kasvaessa myös kaapelin kuormitettavuus kasvaa, huomioiden maaperän lämpötilan ja lämpöresistiivisyyden pysyvän samana. Syvemmällä maaperässä maa-aines on yleensä kosteampaa ja tasalaatuisempaa kuin maan pintakerroksissa, josta nähdään asennusolosuhteiden olevan suotuisimmat lämmön siirtymisen kannalta. (Heinhold 1990, 153.) Kaivosalueella maahan asennetut keskijännitekaapelit on asennettu pääsääntöisesti noin metrin syvyyteen, joiden osalta kuormitettavuuslaskelmissa on käytetty taulukon 11. esittämää korjauskerrointa 0,98.

TAULUKKO 11. Korjauskertoimet kaapelin asennussyvyyden mukaan (SFS 5636 2017, 51)

Depth of laying, m	0,50 - 0,70	0,71 - 0,90	0,91 - 1,10	1,11 - 1,30	1,31 - 1,50
6-30 kV cables	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95

7.2.3 Maan lämpöresistiivisyys

Maan lämpöresistiivisyydellä voidaan kuvata maaperän kykyä siirtää lämpöä. Lämpöresistiivisyys on suurin kaapelin kuormitettavuuteen vaikuttava tekijä, kun kaapeli asennetaan maahan. Lämpö siirtyy kaapelista konduktiolla, eli johtumalla lämmönlähteestä kaikkiin pisteisiin, joissa lämpötila on alhaisempi. Konduktio tapahtuu maahan asennetun kaapelin pinnasta ulospäin, jolloin lämpö siirtyy maaperään. Kaapelin lämpeneminen kuivattaa maassa esiintyvää kosteutta nostaten samalla lämpöresistiivisyyttä. (Enescu ym. 2020, 3.)

Maaperän rakenne oletetaan homogeeniseksi, tasakoosteiseksi materiaaliksi, jonka lämpöresistiivisyysarvo on vakio. Todellisuudessa maaperän koostumus vaihtelee paikoittain, ja se voi olla erilaisista orgaanisista- tai kiviaineksista koostuva rakeinen seos. Rakeisessa maaperässä on paljon ilmaa sekä vettä, johon vaikuttaa maaperän lämpötila sekä kosteusprosentti. Maaperän rakenne voi vaihdella kaapelin lämpötilan sekä vallitsevan sään mukaan. (Enescu ym. 2020, 4.)

Maaperän lämpöresistiivisyys olisi hyvä olla mahdollisimman matala, jolloin kaapelin kuormitettavuus olisi korkeampi. Lämpöresistiivisyyden madaltamiseksi kaapelit asennetaan yleensä tiiviisti hiekkaan, jolloin kaapelissa syntyvä lämpöhäviö poistuu tasaisesti ja tehokkaasti ympäröivään materiaaliin. Yleensä maa-asennuksissa käytetään kivetöntä hiekkaa. (Heinhold 1990, 156.) Kaivosalueella maahan asennetut kaapelit ovat ympäröity kivetömällä hiekalla. Arvioimme maaperän lämpöresistiivisyydeksi $1,2 \text{ K} \cdot \text{m}/\text{W}$, joka tarkoittaa hiekan kosteusprosentin olevan noin 10 %. Kuormitettavuuslaskelmissa käytimme taulukon 12. maan lämpöresistiivisyyden korjauskerrointa 0,92.

SFS 5636 keskijännitevoimakaapeleiden kansallinen standardi ottaa kantaa maalajien lämpöresistiivisyyksiin, jossa maaperän lämpöresistiivisyysarvo 0,7 kuvaa kostea savea ja hiekkaa, jolloin maaperä vastaanottaa hyvin kaapelissa syntyvää lämpöhäviötä. Kuivan hiekan lämpöresistiivisyysarvo on 3,0 jolloin kaapelin lämpöhäviö johtuu maaperään huonosti.

TAULUKKO 12. Korjauskertoimet eri maalajien lämpöresistiivisyyksistä (SFS 5636 2017, 51)

Thermal resistivity of soil K.m/W	0,7	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0
Correction factor	1,10	1,00	0,92	0,85	0,75	0,69	0,63
Examples of thermal resistivities of soil:							
- dry sand (moisture content 0 %) 3,0 K.m/W				- semi-dry and moist gravel 1,0 K.m/W			
- dry gravel and clay 1,5 K.m/W				- moist clay and sand 0,7 K.m/W (moisture content 25 %)			

7.2.4 Maan lämpötila

Maahan asennetun kaapelin kuormitettavuutta tarkasteltaessa huomioidaan myös ympäröivän maan lämpötila. Maan lämpötila voidaan mitata kaapeliojasta kaapelin asennussyvyydestä ilman kaapelin lämmittävää vaikutusta. Auringon säteily vaikuttaa maan lämpenemiseen betoni- tai asfalttipäällysteisissä alueissa, jolloin lämpötila metrin syvyydessä voi nousta $5 \text{ }^\circ\text{C}$ verraten mitattuun arvoon. (Heinhold 1990, 155.)

Kaivosalueella maahan asennetut kaapelit ovat pääsääntöisesti maa-aineksessa, jossa lämpötila ei nouse kesäkuukausina yli 15 celsiusasteen . Muutamassa asennuskohteessa kaapeli on asennettu laajan asfalttialueen alle, joka on huomioitu kuormitettavuuslaskelmissa.

TAULUKKO 13. Korjauskertoimet maaperän lämpötilan ja johdinlämpötilan mukaan (SFS 5636 2017, 51)

Conductor temperature °C	Ground temperature °C										
	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
90	1,13	1,10	1,06	1,03	1,00	0,96	0,93	0,89	0,86	0,82	0,77
80	1,14	1,11	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78	0,73
70	1,17	1,13	1,09	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,73	0,67
65	1,18	1,14	1,10	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77	0,71	0,63

7.3 Kaapelin kuormitettavuus ilmaan asennettaessa

Kaapelin asennuksessa ilmaan tulee ottaa huomioon ilman lämpötila sekä yksijohdinkaapeleiden ja kolmijohdinkaapeleiden asennustavat. Kaapeleita voidaan asentaa lattialle, levyhyllylle tai tikashyl-

lylle. Yhden virtapiirin kaapeleita asennettaessa kaapelihyllylle on huomioitava kaapeleiden virranjako, joka tulisi pitää mahdollisimman tasaisena ja symmetrisenä. Tähän vaikuttaa kaapeleiden sijoittaminen hyllyllä, kaapeleiden asennuskuvio ja hyllyjen päällekkäiset lukumäärät. Lähekkäin asennettujen kaapeleiden johtimien virrat luovat magneettikentän, jotka indusoivat jännitteen kaapeleiden kosketussuojiiin sekä kaapeleiden lämpöhäviöt lämmittävät ympäröiviä kaapeleita heikentäen kuormitettavuutta.

Standardin SFS 5636 mukaisesti suurin sallittu johtimen lämpötila ilmaan asennettaessa on PEX-eristeissä kaapelissa +90 °C. Kaapeleita asennettaessa ulkoilmaan perusolosuhteiden voidaan olettaa ympäröivän ilman lämpötilan osalta +25 °C, tuulen nopeuden osalta 0,6 m/s kohtisuoraan kaapelia ja auringon säteilyn osalta 1000 W/m². Kaapeleita asennettaessa tasoon niiden välissä on vapaata tilaa yhden kaapelin poikkipituuden verran, ja kaapeleita asennettaessa kolmioon kaapelit koskettavat toisiaan.

7.3.1 Kolmijohdinkaapelit

Kolmijohdinkaapeleiden ilma-asennuksissa täytyy huomioida vierekkäisten kaapeleiden lukumäärä, etäisyys toisistaan sekä onko kaapeli asennettu lattialle, levyhyllylle tai tikashyllylle. Kolmijohdinkaapeleiden rakenne vastaa teknisesti kolmioasennusta.

Taulukossa 14. on esitetty korjauskertoimet kolmijohdinkaapeliryhmille viereisten kaapeleiden määrien, sekä kaapelin asennusympäristön mukaisesti.

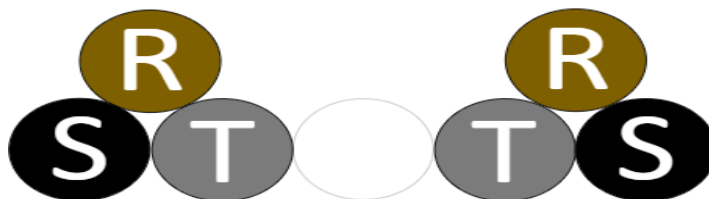
TAULUKKO 14. Korjauskertoimet kolmijohdinkaapeliryhmille ilma-asennuksissa (SFS 5636 2017, 55)

Type of laying		Mutual spacing = One cable diameter (d) Distance from the wall not less than 20 mm					Cables touching each other Cable in contact with the wall						
Number of cables		1	2	3	6	9	Figure	1	2	3	6	9	Figure
On floor		Correction factor					C1	Correction factor					D1
		0,95	0,90	0,88	0,85	0,84		0,90	0,84	0,80	0,75	0,73	
On metal trays (restricted air circulation)	Number of trays						C2						D2
	1	0,95	0,90	0,88	0,85	0,84		0,95	0,84	0,80	0,75	0,73	
	2	0,90	0,85	0,83	0,81	0,80		0,95	0,80	0,76	0,71	0,69	
	3	0,88	0,83	0,81	0,79	0,78		0,95	0,78	0,74	0,70	0,68	
	6	0,86	0,81	0,79	0,77	0,76	0,95	0,76	0,72	0,68	0,66		
On metal ladders	Number of ladders						C3						D3
	1	1,00	0,98	0,96	0,93	0,92		0,95	0,84	0,80	0,75	0,73	
	2	1,00	0,95	0,93	0,90	0,89		0,95	0,80	0,76	0,71	0,69	
	3	1,00	0,94	0,92	0,89	0,88		0,95	0,78	0,74	0,70	0,68	
	6	1,00	0,93	0,90	0,87	0,86	0,95	0,76	0,72	0,68	0,66		
On structures or on wall		1,00	0,93	0,90	0,87	0,86	C4	0,95	0,78	0,73	0,68	0,66	D4
Arrangement where reduction of current is not necessary		Number of cables laid one above the other is not restricted					C5	Number of cables laid side by side is not restricted					D5

7.3.2 Yksijohdinkaapelit

Yksijohdinkaapeleiden ilma-asennuksissa täytyy huomioida kaapelin asennuskuvio, vierekkäisten kaapeleiden lukumäärä sekä onko kaapeli asennettu lattialle, levyhyllylle tai tikashyllylle. Lähekkäin asennetut kaapelit myös lämmittävät toisiaan, mikä vaikuttaa kaapelin kuormitettavuuteen heikentävästi.

Yksijohdinkaapeleiden asennuskuviona voidaan käyttää kolmiota tai tasoa. Kaapeleita asennettaessa kolmioon niiden induktanssit ovat yhtä suuret ja useat rinnakkain kolmioon asennetut kaapeliryhmät tulisi asentaa peilisyymmetrisesti (RT TR RT TR), esimerkkinä kuvan 11. mukaisesti.



KUVA 11. Peilisyymmetrisesti kolmioon asennetut kaapelit

Kaapeleita asennettaessa tasoon huonoin tulos saavutetaan asentamalla kaikki saman vaiheen kaapelit vierekkäin (RRR SSS TTT), esimerkkinä kuvan 12. mukaisesti. (Elovaara & Haarla 2011, 322–323.)



KUVA 12. Tasoon asennetut tasoon vaiheet vierekkäin

Taulukossa 15. esitetään korjauskertoimet yksijohdinkaapeliryhmille asennuskuvion, viereisten kaapeleiden määrien ja asennusympäristön mukaisesti.

TAULUKKO 15. Korjauskertoimet yksijohdinkaapeliryhmille ilma-asennuksissa (SFS 5636 2017, 53)

Type of laying		Cables laid in flat formation			Figure	Cables laid in trefoil formation			Figure
		Mutual spacing = one cable diameter (d) Distance from the wall not less than 20 mm				Mutual spacing = two cable diameters (2d) Distance from the wall not less than 20 mm			
Number of cables		1	2	3		1	2	3	
On floor		Correction factor			A1	Correction factor			B1
		0,92	0,89	0,88		0,95	0,90	0,88	
On metal trays (restricted air circulation)	Number of trays				A2				B2
	1	0,92	0,89	0,88		0,95	0,90	0,88	
	2	0,87	0,84	0,83		0,90	0,85	0,83	
	3	0,84	0,82	0,81		0,88	0,83	0,81	
On metal ladders	Number of ladders				A3				B3
	1	1,00	0,97	0,96		1,00	0,98	0,96	
	2	0,97	0,94	0,93		1,00	0,95	0,93	
	3	0,96	0,93	0,92		1,00	0,94	0,92	
On structures or on wall					A4				B4
		0,94	0,91	0,89		0,89	0,86	0,84	
Arrangement where reduction of current is not necessary		The cooling of cables in flat formation by increased spacing will get better while the losses in metallic screens will increase reducing the current-carrying capacity. Each case must be calculated separately.			B5				

7.3.3 Ympäröivän ilman lämpötila

Kaivosalueen sähkötilat ovat jäädytettyjä, jolloin sähkötilassa syntyvät lämpökuormat saadaan poistettua. Sähkötilojen lämpötila pysyy ympäri vuoden noin 25 °C. Sähkötilaan asennettujen kaapeleiden kuormitettavuuksia tutkiessa ympäröivän ilman vaikutuksesta aiheutuvia korjauskertoimia ei ole tarpeen käyttää. Osa kaapeleista on asennettu prosessitiloihin, joissa lämpötila nousee kesäkuukausina. Prosessitiloihin asennettujen kaapeleiden ympäristön lämpötiloja on tarkasteltu tapauskohtaisesti.

TAULUKKO 16. Korjauskertoimet ympäröivän ilman vaikutuksesta (SFS 5636 2017, 52)

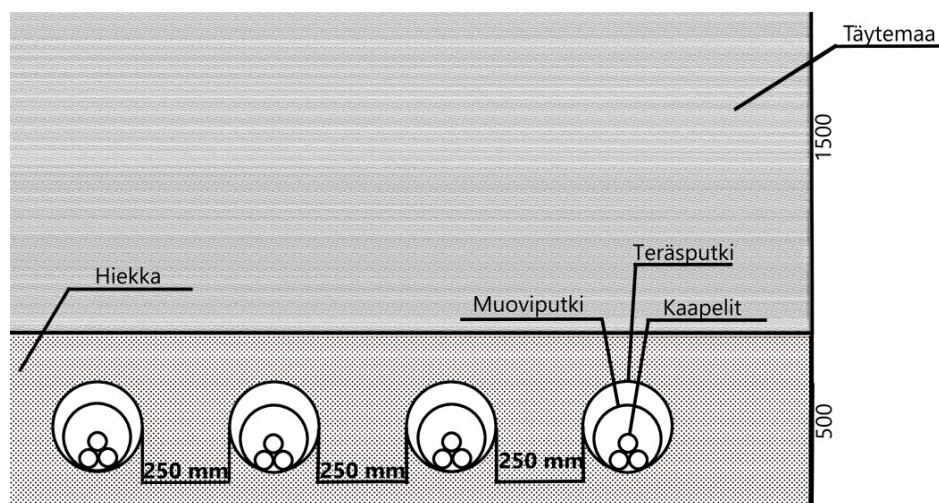
Conductor temperature °C	Ambient air temperature °C									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
90	1,12	1,08	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,74	0,68
80	1,14	1,09	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77	0,69	0,61
70	1,18	1,12	1,06	1,00	0,93	0,86	0,79	0,71	0,62	0,52
65	1,20	1,14	1,07	1,00	0,93	0,85	0,77	0,68	0,57	0,45

7.4 Standardista SFS 5636 poikkeavat asennustavat

7.4.1 Kaapeleiden suojaustavat raskaissa tienalituksissa

Kaivosalueella liikkuu massaltaan yli 300 tonnia painavia kiviautoja, joiden reiteille on asennettu kaapeleita maa-asennuksena. Näissä kiviautoteiden alituksissa kaapeleita on asennettu noin 3–4 metrin

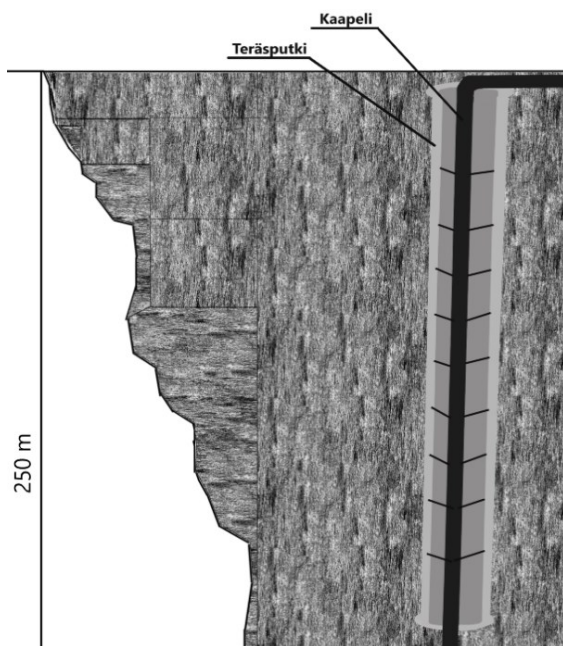
syvyyteen muoviputkeen tai noin 2 metrin syvyyteen teräsputkeen, jonka sisällä on lisäksi muoviputki suojaamassa kaapelia. Kansallisessa SFS 5636 -standardissa ei huomioida kyseisiä asennustapoja, joissa kaapeli on asennettu maahan yli 1,5 metrin syvyyteen tai asennuksiin, joissa kaapelia suojaa sekä muoviputki, että teräsputki.



KUVA 13. Mallinnus raskaiden tienalituksien asennuksista teräs- ja muoviputkien yhdistelmällä

7.4.2 Kaapelin asennustapa kallion sisällä

Toinen tarkempaa tarkastelua vaatinut asennustapa löytyy louhosalueen tunnelipumppaamosta, jossa keskijännitekojeiston syöttökaapeli on asennettu kallioon poratusta reiästä, joka on noin 250 metriä syvä. Kallioon porattuun reikään on asennettu teräsputki, johon kaapeli on kiinnitetty kiinnikkeillä tasaisin välein. Kaapeli laskeutuu kaapelitikkaille, josta se on kytketty keskijännitekojeistoon.



KUVA 14. Kaapelin asennustapa kallion sisällä

8 KAAPELIN KUORMITETTAVUUDEN LASKEMINEN

8.1 Kuormitettavuuden laskumenetelmä

Kaapelin kuormitettavuutta voidaan tarkastella kolmella eri menetelmällä, kansallinen standardi SFS 5636, kansainvälinen standardi IEC 60287 ja numeerinen laskenta. Kaikki esitellyt menetelmät ovat teoreettisia ja ne perustuvat laskemalla saatuihin tuloksiin. Menetelmissä käytetyt laskentatavat ja kuormitettavuudet eroavat toisistaan. (Simonen 2021, 54.)

Numeerinen laskentatapa on kuormitettavuuden laskemisessa tarkin, koska laskennassa käytetään kaapeleiden todellisia parametreja, saaden tulokseksi todellisuutta lähintä arvoa kuormitettavuudesta. (Simonen 2021, 74.) Numeerisessa laskennassa tarkastellaan kaapelissa tapahtuvien häviöiden yhteenlaskua sekä lämmön siirtymistä yleisten lämmönsiirtymiseen liittyvien yhtälöiden mukaisesti (Simonen 2021, 54). Numeerista laskutapaa varten täytyy tietää kaapelin suurin sallittu kuormitusvirta sekä kaapelin rakenne, johdin, eriste, johdineriste, kosketussuoja ja ulkoisten suojakerrosten lämpöresistanssi. Kaapelin tiedot ja ominaisuudet on saatavilla kaapelinvalmistajalta. (Schlabach & Rofalski 2014, 127.)

Kansainvälisessä standardissa IEC 60287 laskentatapa perustuu häviöiden aiheuttaman lämpenemisen ja ympäristön välisen lämpötasapainon laskentaan (Simonen 2010, 24). Kyseisessä laskentatavassa on tuloksien tarkkuuteen vaikuttavia yksinkertaistuksia verrattaessa numeeriseen laskentaan (Simonen 2010, 74).

Kansallisen standardin SFS 5636 laskentatapa on kolmesta menetelmästä epätarkin, koska standardin taulukot pohjautuvat kaapelinvalmistajien arvioihin kaapeleiden kuormitettavuuksista. Erot tuloksissa laskentatapojen välillä eivät ole merkittäviä ja kansallisen standardin mukaisesti laskettu kuormitettavuudet ovat hieman pienempiä kuin muilla mainituilla menetelmillä. (Simonen 2010, 73.)

Kansallisen standardin soveltaminen laskennassa perusteltua, sillä kaapeleiden kuormitettavuuden arviointi toteutetaan Suomessa yleisimmin standardin SFS 5636 mukaisesti. (Simonen 2010, 20.)

8.2 Kuormitettavuuslaskelmissa käytetty menetelmä

Kuormitettavuustarkasteluissa on käytetty kansallisen standardin SFS 5636 kuormitettavuustaulukoita. Standardin kuormitettavuustaulukoiden kaapelin peruskuormitettavuudeksi oletetaan maan alapuolisissa asennuksissa maaperän korkeimmaksi lämpötilaksi $+15\text{ °C}$, asennussyvyudeksi $0,7\text{ metriä}$ ja maan lämpöresistivisyydeksi $1,0\text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$. Maan yläpuolisissa asennuksissa auringonsäteily oletetaan olevan $1000\text{ W}/\text{m}^2$, tuulen nopeudeksi $0,6\text{ m/s}$ ja ilman lämpötilan olevan $+25\text{ °C}$.

Asennusolosuhteet kaivosalueella muuttuvat peruskuormitettavuudesta, joten kaapelin kuormitettavuus kerrotaan asennustavan mukaan standardin antamalla korjauskertoimilla. Osa kaivosalueen toiminnassa olevista kaapeleista on asennettu vuodesta 1979 alkaen, joihin on sovellettu SFS 5636 standardin uusinta julkaisua, sillä vanhentuneiden standardien korjauskertoimet eivät poikkeavat standardin uusimmasta julkaisusta. Osassa kuormitettavuuslaskelmissa on huomioitu myös taulukon 10. korjauskertoimia kaapeleiden asennettaessa maahan betonikanaaliin.

Kaapeleiden peruskuormitettavuus määräytyy kappaleessa 5 esiteltyjen taulukoiden mukaisesti kaapelin pinta-alan ja asennustavan mukaisesti. Kaivosalueen keskijänniteverkossa on käytetty kosketussuojapiireiltään avointa ja suljettua asennustapaa.

Standardin SFS 5636 ulkopuolisen asennustapojen kuormitettavuuksia selvittäessä sovellettiin kansallista standardia 3–4 metrin syvyyteen muoviputkeen asennettujen kaapeleiden osalta. Taulukossa 11 on esitetty maahan asennettujen kaapeleiden korjauskertoimet asennussyvyyden mukaan. Laskennassa on oletettu, että korjauskertoimet laskevat samassa suhteessa esiteltyjen asennussyvyysien korjauskertoimet. Asennuksissa, joissa kaapeli on suojattu muoviputkella sekä teräsputkella noin 2 metrin syvyydessä ja kallion sisällä teräsputkessa 250 metriä kulkevalle kaapelille kansallista standardia ei voinut soveltaa luotettavasti, joten kuormitettavuudet kyseisille kaapeleille selvitettiin kansainvälisen IEC 60287 -standardin mukaisesti. Kansainvälisen standardin avulla selvitettiin häviöiden aiheuttamat lämpenemät sekä ympäristön väliset lämpötasapainot.

8.3 Esimerkkilaskelma 1

Kaapelin kuormitettavuus on laskettu AHXAMK-W 3x185Al+35Cu kaapelille. Kaapelin asennuskuvio on kolmio ja kaapelin on asennettu kaapeliojaan putkeen yhden muun kaapelin kanssa, joiden etäisyys on 250 millimetriä. Asennussyvyys maassa on yksi metri ja maa-aineksena toimii hiekka, jonka lämpötila on 15 °C. Kaapelin kosketussuojapiiri on suljettu.

Kuormitettavuus maassa:

AHXAMK-W 3x185Al+35Cu kaapelin kuormitettavuus maassa on taulukon 2. mukaisesti 330 A

Taulukon 9. mukaisesti putkeen asennettujen vierekkäisten (250 mm) kaapeleiden (2 kpl) korjauskerroin on 0,75

Taulukon 11. mukaisesti kaapelin asennussyvyyden (1 m) korjauskerroin on 0,98

Taulukon 12. mukaisesti kaapelin vierusmateriaalin (1,2 K·m/W) korjauskerroin on 0,92

Taulukon 13. mukaisesti maan lämpötilan (15 °C) korjauskerroin on 1,00

Kaapelin kuormitettavuus kerrotaan kaikilla huomioituilla korjauskertoimilla,

$$kk = 0,75 \cdot 0,98 \cdot 0,92 \cdot 1,00 = 0,6762$$

$$330 \text{ A} \cdot 0,6762 = 223 \text{ A}$$

AHXAMK-W 3x185+35Cu kaapelin kuormitettavuus edellä mainitussa olosuhteessa on 223 A

8.4 Esimerkkilaskelma 2

Kaapelin kuormitettavuus laskettu APYAKMM 3x185 kaapelille. Kaapelin asennuskuvio on kolmio ja kaapeli on asennettu prosessitalan kaapelihyllyyn, josta se kulkee kaapelihyllyllä putkisiltaa pitkin ul-

kona. Prosessitilassa kaapelihyllyjä on päällekkäin 2 ja kuormitettavuutta laskettavan kaapelin hyllyllä kaapeleita on viisi kappaletta ja putkisillalla kaapelihyllyssä menee yksi kaapeli. Taulukon 14. korjauskertoimia täytyi interpoloida saadakseen viidelle kaapelille korjauskertoimen.

Kuormitettavuus prosessitilassa:

APYAKMM 3x185 kaapelin kuormitettavuus ilmassa on taulukon 4. mukaisesti 270 A

Taulukon 14. mukaisesti vierekkäisten kaapeleiden (5 kpl) korjauskerroin on 0,74

Taulukon 16. mukaisesti ympäristön lämpötilan (40 °C) korjauskerroin on 0,77

Kaapelin kuormitettavuus kerrotaan kaikilla huomioituilla korjauskertoimilla,

$$kk = 0,74 \cdot 0,77 = 0,5698$$

$$270 A \cdot 0,5698 = 154 A$$

Kuormitettavuus putkisillalla:

Taulukon 13. mukaisesti vierekkäisten kaapeleiden (0) korjauskerroin on 1,00

Taulukon 16. mukaisesti ympäröivän lämpötilan (30 °C) korjauskerroin on 0,93

Kaapelin kuormitettavuus kerrotaan kaikilla huomioituilla korjauskertoimilla,

$$kk = 1,00 \cdot 0,93 = 0,93$$

$$270 A \cdot 0,93 = 251 A$$

Esimerkissä 2. laskettiin saman kaapelin korjauskertoimet eri asennusolosuhteissa. Laskuesimerkeistä huomataan, että kuormitettavuus prosessitilassa on huonompi, kuin kuormitettavuus putkisillalla. Täten esimerkin APYAKMM 3x185 kaapelin kuormitettavuus on 154 A.

8.5 Esimerkilaskelma 3

Kaapelin kuormitettavuus on laskettu APYAKMM 3x(3x240Al) kaapelille. Kaapeli on asennettu 1970-luvulla, jolloin käytössä on ollut sen aikainen asennusohje ja kuormitettavuusstandardi keskijännitekaapelille. Kaapelin kuormitettavuuden laskennassa on sovellettu voimassa olevaa kansallista standardia, sillä sen korjauskertoimet eivät poikkea asennusaikaisen standardin korjauskertoimista. Laskuesimerkissä käytetään lisäksi kaapelin suojaustapana asennusta betoni- tai tiililaatalle, tiilikiville sekä betoni- tai muovikourulle korjauskertoimia vuoden 1989 standardista, sillä kaapeli on asennettu betonikanaaliin.

Kuormitettavuus maassa:

APYAKMM 3x(3x240Al) kaapelin kuormitettavuus maassa on 1005 A

Taulukon 8. mukaisesti maahan asennetun vierekkäisten (0 mm) kaapeleiden (4 kpl) korjauskerroin on 0,63

Taulukon 10. mukaisesti kaapelin suojaustavan korjauskerroin on 0,9

Taulukon 11. mukaisesti kaapelin asennussyvyyden (1 m) korjauskerroin on 0,98

Taulukon 12. mukaisesti kaapelin vierusmateriaalin (1,2 K·m/W) korjauskerroin on 0,92

Taulukon 13. mukaisesti maan lämpötilan (15 °C) korjauskerroin on 1,00

$$kk = 0,63 \cdot 0,98 \cdot 0,92 \cdot 1,00 \cdot 0,9 = 0,511207$$

$$1005 A \cdot 0,511207 = 514 A$$

APYAKMM 3x(3x240Al) kaapelin kuormitettavuus edellä mainitussa asennusolosuhteessa on 514A.

9 KAAPELIN KUORMITETTAVUUS IEC 60287 -STANDARDIN MUKAISESTI

9.1 Kuormitettavuuden laskumenettely

Kansallisen IEC 60287 -standardin avulla voidaan laskea lämpötilaero vaihejohtimen ja ympäristön välillä. Standardissa tuodaan esille yhtälöt, joiden avulla voidaan laskea kaapelin rakenteissa ja johtimissa syntyvät tehohäviöt. Tehohäviöt ja ympäristöolosuhteet määräävät kaapelin kuormitettavuusvirran. Maahan asennetun kaapelin johtimen lämpenemä voidaan laskea yhtälöllä (IEC 60287-1-1),

$$\Delta\theta = (I^2R + 0,5 \cdot W_d)T_1 + [I^2R(1 + \lambda_1) + W_d]nT_2 + [I^2R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d]n(T_3 + T_4) \quad (5)$$

missä,

I = kuormitusvirta

$\Delta\theta$ = johtimen lämpötilannousu ympäristöön nähden (K)

R = vaihtovirtaresistanssi johtimen pituusyksikköä kohti maksimikäytössä (Ω/m)

W_d = johdinta ympäröivän eristeen dielektrinen häviö pituusyksikköä kohti (W/m)

T_1 = lämpöresistanssi pituusyksikköä kohti johtimen ja vaipan välillä (K· m/W)

T_2 = lämpöresistanssi pituusyksikköä kohti vaipan ja armeerauksen välissä (K· m/W)

T_3 = kaapelin ulkokuoren lämpöresistanssi pituusyksikköä kohti (K· m/W)

T_4 = lämpöresistanssi pituusyksikköä kohti kaapelin pinnan ja kaapelia ympäröivän aineen välillä (K· m/W)

n = kuormitettujen johtimien lukumäärä kaapelissa

λ_1 = metallivaipan häviöiden suhde kaapelin kaikkien johtimien kokonaishäviöihin

λ_2 = armeerauksen häviöiden suhde kaapelin kaikkien johtimien kokonaishäviöihin

Kuormitusvirta voidaan laskea yhtälöstä 6 muodossa (IEC 60287-1-1),

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d \left[\frac{1}{2} T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4) \right]}{R[T_1 + n(1 + \lambda_1)T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)]} \right]^{0,5} \quad (6)$$

9.2 Johtimen lämpötilannousu ympäristöön nähden

Johtimen lämpötilannousu ympäristöön nähden voidaan laskea johtimen suurimman käyttölämpötilan erotuksena maaperän arvoituun lämpötilaan kelvineinä (IEC 60287-1-1),

$$\Delta\theta = \theta_{cable} - \theta_{soil} \text{ (K)} \quad (7)$$

9.3 Kaapelissa syntyvät tehohäviöt

Kaapelia kuormitettaessa kaapelin sisällä syntyy lämpöhäviöitä. Kaapelin lämpöhäviöitä on kahdenlaisia, virrasta aiheutuvia johdinhäviöitä sekä jännitteestä aiheutuvia dielektrisiä häviöitä. Johdinhäviöt syntyvät virran kulkiessa kaapelin metallisissa osissa ja dielektriset häviöt syntyvät eristeen dielektrisestä vaikutuksista. (Anders 1997, 13-15.)

9.3.1 Johdinhäviöt

Johtimessa esiintyviä lämpöhäviöitä syntyy vain, kun kaapeli on varustettu metallisilla komponenteilla. Lämpöhäviöt ovat riippuvaisia virran suuruudesta sekä johtimen resistanssista. Johtimen tehohäviöt voidaan laskea yhtälöllä,

$$P_h = I^2 \cdot R \text{ (W/m)} \quad (8)$$

Johtimen vaihtovirtaresistanssi on aina tasavirtaresistanssia suurempi, johtuen kaapelin pintavaikutusilmiöstä ja lähivaikutusilmiöstä. Vaihtovirtaresistanssi suurimmassa käyttölämpötilassa voidaan laskea yhtälöllä (IEC 60287-1-1),

$$R = R'(1 + y_s + y_p) \text{ (}\Omega/\text{m)} \quad (9)$$

missä,

R = johtimen vaihtovirtaresistanssi käyttölämpötilassa (Ω/m)

R' = johtimen tasavirtaresistanssi käyttölämpötilassa (Ω/m)

y_s = pintavaikutusilmiötä kuvaava tekijä

y_p = lähivaikutusilmiötä kuvaava tekijä

Johtimen tasavirtaresistanssi käyttölämpötilassa voidaan laskea yhtälöllä (IEC 60287-1-1),

$$R' = R_0[1 + \alpha_{20}(\theta_c - 20^\circ\text{C})] \text{ (}\Omega/\text{m)} \quad (10)$$

missä,

R_0 = johtimen tasavirtaresistanssi 20 °C lämpötilassa (Ω/m)

α_{20} = resistiivisyyden lämpötilakerroin johdinmateriaalille 20 °C lämpötilassa

θ_c = johtimen käyttölämpötila (°C)

TAULUKKO 17. Metallien resistiivisyydet ja lämpötilakertoimet (IEC 60287-1-1)

Metallin ominaisuus	Johdin ja kosketussuoja		Metallivaippa ja armeeraus	
	Kupari	Alumiini	Lyijy	Alumiini
Resistiivisyys 20 °C $\Omega \cdot m$	$1,7241 \cdot 10^{-8}$	$2,8264 \cdot 10^{-8}$	$21,4 \cdot 10^{-8}$	$2,84 \cdot 10^{-8}$
Resistiivisyyden lämpötilakertoimet 20 °C	$3,93 \cdot 10^{-3}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$

Johtimen tasavirtaresistanssi 20 °C lämpötilassa voidaan laskea yhtälöllä (IEC 60287-1-1),

$$R_0 = \rho \frac{L}{A} \quad (\Omega/m) \quad (11)$$

missä,

ρ = johtimen resistiivisyys 20 °C lämpötilassa (Ω/m)

L = johtimen pituus (m)

A = johtimen poikkipinta-ala (m^2)

9.3.2 Pintavaikutusilmiö (virranahto)

Pintavaikutusilmiössä vaihtovirta pyrkii kulkemaan johtimen pintaosissa, muodostaen epätasaisen virran jakautumisen johtimen poikkipinnalle. Virranahdoksi kutsuttu ilmiö kasvattaa johtimen vaihtovirtaresistanssia. Taajuus sekä johtimen tasavirtaresistanssi määräävät pintavaikutusilmiön suuruuden. Virranahto voidaan laskea yhtälöllä (IEC 60287-1-1),

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4} \quad (12)$$

jonka käytetty muuttuja x_s voidaan laskea yhtälöllä (IEC 60287-1-1),

$$x_s = \sqrt{\frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7} k_s} \quad (13)$$

missä,

f = taajuus (Hz)

R' = johtimen tasavirtaresistanssi käyttölämpötilassa (Ω/m)

k_s = kerroinarvo

9.3.3 Lähivaikutusilmiö

Lähivaikutusilmiössä virrallisen johtimen virrantiheyden jakautuma muuttuu vierekkäisen virrallisen johtimen synnyttämän magneettikentän vuoksi. Tämän vuoksi kaapelien etäisyydet vaikuttavat lähivaikutusilmiöön. Kolmioasennuksessa lähivaikutusilmiö on suurempi kuin tasoasennuksessa.

Lähivaikutusilmiön kerroin y_p voidaan laskea yhtälöllä (IEC 60287-1-1),

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \left[0,312 \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} + 0,27} \right] \quad (14)$$

missä,

d_c = johtimen halkaisija (mm)

s = vaihejohtimien keskipisteiden välinen etäisyys (mm)

Muuttuja x_p voidaan laskea yhtälöllä (IEC 60287-1-1),

$$x_p = \sqrt{\frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7} k_p} \quad (15)$$

missä,

f = taajuus (Hz)

R' = johtimen tasavirtaresistanssi käyttölämpötilassa (Ω/m)

k_p = kerroinarvo

TAULUKKO 18. Kertoimet k_s ja k_p (IEC 60287-1-1)

Kerroinarvo	Johdintyyppi			
	Alumiini		Kupari	
	Kerrattu	Milliken (5 sek.)	Kerrattu	Milliken (5 sek.)
k_s	1,0	0,190	1,0	0,435
k_p	1,0	0,370	1,0	0,370

9.4 Dielektriset häviöt

Vaihtojännitekentässä kaapelin eristeessä syntyy dielektrisiä häviöitä, joihin vaikuttaa kaapelissa oleva eristemateriaali, kaapelin poikkipinta sekä käyttöjännite. Dielektriset häviöt syntyvät vaihtosähkökentän suunnanmuutoksista aiheutuvista molekyylikitkoista eristeessä.

Dielektriset häviöt voidaan laskea yhtälöllä (IEC 60287-1-1),

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta \quad (W/m) \quad (16)$$

missä,

W_d = eristyksen dielektriset häviöt (W/m)

ω = kulmataajuus (rad/s)

C = Johtimen kapasitanssi (F/m)

$\tan \delta$ = eristysmateriaalin häviökerroin

TAULUKKO 19. Dielektrisyyssvakion ja häviökertoimen arvoja (IEC 60298-1-1)

Type of cable	ϵ	$\tan \delta$
Cables insulated with impregnated paper		
Solid type, fully impregnated, preimpregnated, or mass-impregnated nondraining	4	0.01
Oil-filled, low-pressure		
up to $U_o = 36$ kV	3.6	0.0035
up to $U_o = 87$ kV	3.6	0.0033
up to $U_o = 160$ kV	3.5	0.0030
up to $U_o = 220$ kV	3.5	0.0028
Oil-pressure, pipe-type	3.7	0.0045
Internal gas-pressure	3.4	0.0045
External gas-pressure	3.6	0.0040
Cables with other kinds of insulation		
Butyl rubber	4	0.050
EPR, up to 18/30 kV	3	0.020
EPR, above 18/30 kV	3	0.005
PVC	8	0.1
PE (HD and LD)	2.3	0.001
XLPE up to and including 18/30 (36) kV, unfilled	2.5	0.004
XLPE above 18/30 (36) kV, unfilled	2.5	0.001
XLPE above 18/30 (36) kV, filled	3	0.005
Paper-polypropylene-paper (PPL)	2.8	0.001

Johtimen kapasitanssi voidaan laskea yhtälöllä (IEC 60287-1-1),

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \ln\left(\frac{D_i}{d_{cs}}\right)} 10^{-9} (F/m) \quad (17)$$

missä,

ε = eristysmateriaalin suhteellinen permittiivisyys

D_i = eristyksen ulkohalkaisija (mm)

d_{cs} = johdinsuojan ulkohalkaisija (mm)

9.5 Kosketussuojan häviöt

Kosketussuojassa syntyvät häviöt muodostuvat virran indusoimista kiertävistä virroista sekä pyörrevirroista. Kiertävät virrat sekä pyörrevirrat aiheuttavat tehohäviöitä kaapelissa. Kiertävät virrat esiintyvät vain, jos kosketussuojapiiri on kummastakin päästä kytkettyinä, eli suljettu. Suljetussa kosketussuojapiirissä pyörrevirtahäviöitä ei oteta huomioon.

Häviökerroin λ_1 käsittelee kosketussuojan häviöiden suhteen johtimen häviöihin. Kosketussuojan häviökerroin voidaan laskea yhtälöllä (IEC 60287-1-1),

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1 \quad (18)$$

missä,

λ'_1 = kosketussuojan kiertävien virtojen häviöiden suhde johdinhäviöihin

λ''_1 = kosketussuojan pyörrevirtahäviöiden suhde johdinhäviöihin

9.5.1 Kiertävien virtojen häviökerroin

Kosketussuojassa esiintyvien kiertävien virtojen häviökerroin kolmioon asennetulle kolmelle yksijohdinkaapelille voidaan laskea yhtälöllä (IEC 60287-1-1),

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \quad (19)$$

missä,

R_s = kosketussuojan resistanssi käyttölämpötilassa (Ω/m)

R = johtimen vaihtovirtaresistanssi käyttölämpötilassa (Ω/m)

X = kosketussuojan reaktanssi (Ω/m).

Kosketussuojan resistanssi käyttölämpötilassa voidaan laskea yhtälöllä (IEC 60287-1-1),

$$R_S = R_{S0}[1 + \alpha_{20}(\Theta_{SC} - 20)] \text{ (}\Omega/m\text{)} \quad (20)$$

missä,

R_S = kosketussuojan resistanssi käyttölämpötilassa (Ω/m)

R_{S0} = kosketussuojan resistanssi 20 °C lämpötilassa (Ω/m)

α_{20} = resistiivisyyden lämpötilakerroin johdinmateriaalille 20 °C lämpötilassa

Θ_{SC} = arvioitu kosketussuojan maksimilämpötila

Kosketussuojan resistanssi 20 °C lämpötilassa voidaan laskea yhtälöllä (IEC 60287-1-1),

$$R_{S0} = \rho_{cu} \cdot \frac{l_{sc}}{A_{sc}} \quad (21)$$

missä,

R_{S0} = kosketussuojan resistanssi 20 °C lämpötilassa (Ω/m)

ρ_{cu} = kuparijohtimen resistiivisyys 20 °C lämpötilassa (Ω/m)

l_{sc} = johtimen pituus (m)

A_{sc} = johtimen pinta-ala (m)

Kolmioasennuksessa kosketussuojan reaktanssi voidaan laskea yhtälöllä (IEC 60287-1-1),

$$X = 2\omega 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right) \text{ (}\Omega/m\text{)} \quad (22)$$

missä,

ω = kulmataajuus (rad/s)

s = vaihejohtimien keskipisteiden välinen etäisyys (mm)

d = keskimääräinen kosketussuojan halkaisija (mm)

9.5.2 Pyörrevirtahäviöiden kerroin

Pyörrevirtahäviöitä esiintyy kosketussuojan poikkileikkauksissa, mutta keskijännitekaapeleissa niiden merkitys on hyvin pieni. Keskijännitekaapeleissa pyörrevirtahäviökertoimeksi voidaan todeta $\lambda_1'' \approx 0$.

9.6 Lämpöresistanssit

Kaapelin rakenteessa olevat nauhoitukset, eristys, ulkovaippa ja ympäristön lämpöresistanssit vaikuttavat kaapelin kuormitettavuuteen. Johtimessa häviötehon aiheuttama lämpenemä siirtyy kaapelin rakennekerrosten läpi ympäristöön. Suuremman kuormitettavuuden kannalta kaapelin materiaalilla sekä ympäristöllä tulisi olla mahdollisimman pieni lämpöresistanssi. Tällöin lämpö saadaan siirtymään kaapelin pinnalta ympäristöön tehokkaasti.

9.6.1 Johtimen ja eristyksen välinen lämpöresistanssi

Yksijohtimisen kaapelin johtimen ja eristyksen välinen lämpöresistanssi voidaan laskea yhtälöstä (IEC 60287-2-1),

$$T_1 = \frac{\rho_1}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_1}{d_c} \right) \quad (\text{K} \cdot \text{m/W}) \quad (23)$$

missä,

ρ_1 = eristyksen lämpöresistanssi (K·m/W)

d_c = johtimen halkaisija (mm)

t_1 = eristyksen paksuus (mm)

TAULUKKO 20. Kaapelimateriaalien lämpöresistanssisarvoja (IEC 60287-2-1)

Materiaali	Lämpöresistanssi (K·m/W)
Alumiini, kupari	0
PEX	3,5
PE	3,5
Paisuva nauha	6

9.6.2 Vaipan ja armeerauksen välinen lämpöresistanssi

Tutkituiden kaapeleiden rakenteissa ei ole armeerausta, joten vaipan ja armeerauksen välinen lämpöresistanssi on,

$$T_2 = 0 \quad (24)$$

9.6.3 Ulkovaipan lämpöresistanssi

Ulkovaipan lämpöresistanssi kolmioon asennetuille kaapeleille voidaan laskea yhtälöstä (IEC 60287-2-1),

$$T_3 = \frac{\rho_3}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_3}{d_s} \right) \quad (\text{K} \cdot \text{m/W}) \quad (25)$$

missä,

ρ_3 = ulkovaipan lämpöresistiivisyys (K· m/W) (taulukko 20)

d_s = ulkovaipan alla olevan kerroksen ulkohalkaisija (mm)

t_3 = ulkovaipan paksuus (mm)

9.6.4 Kaapelin ulkoinen lämpöresistanssi

Kaapelin ulkoinen lämpöresistanssi kolmioon asennetulle yksijohdinkaapelille voidaan laskea yhtälöstä (IEC 60287-2-1),

$$T_{4\text{soil}} = \frac{1,5}{2\pi} \rho_4 [\ln(2u) - 0,630] \quad (\text{K} \cdot \text{m/W}) \quad (26)$$

missä,

ρ_4 = maaperän lämpöresistiivisyys (K· m/W) (taulukko 20)

$$u = \frac{2d}{d_e}$$

d = kaapelin asennussyvyys, johtimen keskipisteeseen mitattuna (mm)

d_e = kaapelin ulkohalkaisija (mm)

Maahan asennetun, muoviputkella suojatun kaapelin ulkoisia lämpöresistansseja varten täytyy laskea myös kaapelin ja muoviputken välinen lämpöresistiivisyys yhtälöllä (IEC 60287-2-1),

$$T_{4C\&D} = \frac{U}{1 + 0,1(V + Y\Theta_m)D_e} \quad (\text{K} \cdot \text{m/W}) \quad (27)$$

missä,

$T_{4C\&D}$ = kaapelin ja suojaputken välinen lämpöresistiivisyys (K· m/W)

U = suojausmateriaalin vakioarvo

V = suojausmateriaalin vakioarvo

Y = suojausmateriaalin vakioarvo

θ_m = kaapelin ja putken välinen keskilämpötila (°C)

D_e = kaapelin ulkohalkaisija (mm)

Materiaalien U , V ja Y vakioarvot on esitetty IEC 60287-2-1 taulukossa 4.

Suojaputken lämpöresistiivisyys yhtälöllä (IEC 60287-2-1),

$$T_{4D} = \frac{pt}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{D_0}{D_d}\right) \quad (\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}) \quad (28)$$

missä,

T_{4D} = suojaputken lämpöresistiivisyys (K·m/W)

pt = materiaalin lämpöresistiivisyysarvo (K·m/W)

D_0 = suojaputken ulkohalkaisija (mm)

D_d = suojaputken sisähalkaisija (mm)

Kaapeleiden ulkoisia lämpöresistiivisyyksiä laskiessa kaavat voivat muuttua kaapelin kuormitusten jakautumisten, asennuskuvion, johdinten lukumäärän, vaipan materiaalin sekä suojaputkien asennustapojen vuoksi. Opinnäytetyössä IEC 60287 -standardilla lasketut kuormitettavuudet esimerkki-kaapeleille on esitetty liitteessä 2.

10 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää keskijännitekaapelin kuormitettavuuteen vaikuttavat tekijät ja niiden syyt. Työssä tavoitteena oli myös selvittää kaivosalueen keskijänniteverkon nykyiset kuormat sekä kuormitettavuudet jokaiselle kaapelille. Kuormitettavuusselvityksen jälkeen voidaan tarkastella keskijännite verkon jokaisen kaapelin kuormitushuippuja, kuormitettavuutta sekä kuinka paljon jokaista kaapelia voidaan vielä kuormittaa. Opinnäytetyössä selvitetystä tuloksista laadittiin taulukko toimeksiantajan käyttöön, josta ilmenee kuormitettavuuslaskelma keskijänniteverkon lähdöittäin.

Kuormitettavuusselvitystä varten kaapeleista tarvittavat tiedot sekä johtolähdöt kojeistoissa olivat helposti saatavilla kaivosalueen yleiskaaviosta. Kaivosalueen jakeluverkosta laadittiin pelkistetty mallinnus opinnäytetyöhön mallintamaan jakeluverkon rakennetta. Kaivosalueella kaapelointien pituudet vaihtelevat huomattavasti, mutta asennusolosuhteet pysyvät pääsääntöisesti samanlaisina koko kaapeliyhteyden ajan. Asennusolosuhteiden yhtenäisyyksien ansiosta kuormitettavuusselvitykset kyseisille kaapeleille olivat selkeästi laskettavissa. Asennusolosuhteiden muutoksissa kuormitettavuudet laskettiin jokaiselle olosuhteelle erikseen, jolloin kuormitettavuudeksi valikoitui kuormitettavuudeltaan epäedullisin tapa. Asennusolosuhteiden muutoksia ilmeni kaapelikellareissa, prosessitilojen ja putkisiltojen välillä sekä maa-asennuksissa rinnakkaisten kaapeliyhteyksien muutoksina. Asennusolosuhteiden muutoksissa maan yläpuolisia asennuksia voitiin käydä tarkastelemassa prosessitiloissa sekä kaapelikellareissa. Kaapelit olivat selkeästi asennettu maan yläpuolisissa asennuksissa, jolloin niiden sijainteja tarkasteltiin silmämääräisesti. Kaapeleiden asennustavoista opin kaapeleiden asennustyyliä sekä erilaisia kiinnitystapoja putkiin sekä kaapelitikkaisiin.

Kaapeleista ja asennustavoista kerätyt tulokset dokumentoitiin taulukkoon, jota hyödynnettiin kuormitettavuuslaskelmissa standardien avulla. Kuormitettavuuden arviointiin valittiin kansallisen SFS 5636 esittämä menetelmä, jossa erilaisille asennusolosuhteille oli määritelty korjauskertoimet. Opinnäytetyön edetessä ja tarkempaa tutkimusta tehdessä asennustavoille kaivosalueelta selvisi, että osa maahan kaapeloiduista kaapeleista oli jouduttu asentamaan epätavallisilla asennustavoilla, johtuen raskaista tienalituksista sekä kaapelin suojuuksista. SFS 5636 -standardi ei ottanut kantaa asennustavoille, joissa kaapelin suojana toimii muoviputki sekä teräsputki eikä asennustavalle, jossa kaapeli on asennettu noin 250 metriä teräsputkeen kallion sisälle. Kuormitettavuuksien arviointi kyseisille kaapeleille ei olisi ollut luotettava menetelmä, joten kuormitettavuudet laskettiin kansainvälisen IEC 60287 -standardin mukaisesti. IEC 60287 -standardin avulla kuormitettavuudet laskettiin kaapelissa syntyvien häviöiden ja lämpöresistiivisyyksien suhteella ympäröivän materiaalin lämpötilaan. Kuormitettavuuslaskelmat standardeilla sujuivat hyvin, vaikka kesken opinnäytetyön täytyi tutustua ennestään tuntemattomaan standardiin ja standardissa esitettyihin yhtälöihin.

Kaivosympäristössä raskaissa tienalituksissa kaapelit on suojattu noin kahden metrin syvyydessä päällekkäin olevalla muoviputkella ja teräsputkella. Kahden suojaputken avulla voidaan suojata kaapelia raskailta, kaapelia kohti tulevilta massoilta. Kaapeleiden suojaustapa alentaa kuormitettavuutta merkittävästi, sillä kaapelissa syntyvät lämpöhäviöt poistuvat lopulta ympäröivään maaperään usean eri materiaalin läpi. Materiaalien välillä vallitsevat ilmavälit sekä materiaalien lämpöresistiivisyydet poistuvat kaapelin lähiympäristöstä konvektion ja konduktion avulla ympäristöön. Tämä häviöistä syntyvän lämmön nousun hidaskuormituminen nostaa kaapelin johtimien sekä asennusympäristön lämpötilaa, jonka myötä kuormitettavuus kaapelilla alenee. IEC 60287 -standardin kuormitettavuusselvityksien tulokset vastasivat asennustavan mukaista kuormitettavuutta. Kaivosalueella yksi kaapeli on asennettu kulkemaan noin 250 metriä kallion sisällä olevaan pumppaamoon.

Kaapelin asennustapa perustuu kaapelin suojaukseen, sillä ilman erittäin huolellista suojausta louhinta aiheuttaisi kaapelin eristeeseen ja johtimiin vahinkoja, johtuen katkoksiin sähkönjakelussa. Kaapelin kuormitettavuus selvitettiin IEC 60287 -standardin yhtälöillä. Kuormitettavuuslaskelmissa tulos vastaa asennustavan mukaista kuormitettavuutta. IEC 60287 -standardin mukaisissa kuormitettavuuslaskelmissa nousi esille teräsputken pieni vaikutus kuormitettavuuteen, joka johtuu teräksen lämpöresistiivisyydestä. Teräksen lämpöresistiivisyysarvo on pieni, joka tarkoittaa materiaalin johtavan ja päästävän lämmön helposti läpi.

Kansallisen standardin kuormitettavuuslaskelmissa sain uusia näkökulmia kaapelin rakenteen, asennusolosuhteiden ja muiden läheisten lämmönlähteiden vaikutusta kuormitettavuuteen. Kansainvälisen standardin kuormitettavuuslaskelmissa perehdyin tarkasti johtimeen ja eristeeseen kohdistuviin häviöihin, ja niihin vaikuttaviin tekijöihin. Kuormitettavuuslaskelmissa opin myös eri materiaalien lämpöresistiivisyyksiä ja niiden vaikutusta kuormitettavuuteen. Lisäksi standardin myötä opin mitä lämpöresistiivisyyksiä täytyy ottaa huomioon kaapeleiden eri asennusolosuhteissa.

Opinnäytetyön aikana osaaminen kuormitettavuuteen vaikuttavista tekijöistä sekä vaikutusten suuruuksista syventyi huomattavasti. Maan lämpöresistiivisyys, kaapelin suojaukset sekä viereisten kaapeleiden lukumäärät ovat suurimpia kuormitettavuuteen vaikuttavia tekijöitä. Maan lämpöresistiivisyys arvioitiin käytössä olevien asennustapojen mukaisesti asiantuntijoiden avulla ja suojaukset sekä muut läheiset kaapelit selvitettiin asiantuntijan avulla. Olosuhteiden vaikutuksissa kuormitettavuuteen pohdittiin huonoin todellinen tilanne asennusolosuhteessa. Maan lämpöresistiivisyydelle arvioitiin suurempi arvo, kuin liian pieni sekä ympäristön lämpötilalle prosessitilassa arvioitiin suurempi lämpötila, kuin pienempi. Kuormitettavuuslaskelmissa kohdistui jo rakennettuun verkkoon, joten selvitystyössä arvioitiin verkon nykyistä tilaa, ei mitoitettu verkkoa uudestaan.

Tavoite kaivosalueen kuormitettavuuslaskelmissa jokaiselle kaapelille taulukoituna toteutui. Kuormitettavuuslaskelmien tuloksista voidaan päätellä, että kaivosalueen kaapelointien kuormitettavuusmitoitus on tehty tulevaisuuden laajentamisen näkökulmasta. Suurimmalla osalla kaapeleista kuormitettavuusreserviä oli erittäin paljon, jolloin kyseisiä kaapeleita ei tarvitse lähtökohtaisesti uusien toiminnan laajenemisen myötä. Kuormitusreserviltään kriittisimmät paikat löytyivät prosesseissa toimivista myllyistä. Normaalisissa ajotilanteissa myllyjen kuormitus on tasaista ja suurimmat virtapiikit löytyvät myllyjen käynnistymisen aikaan. Jos myllyjen tarvitsemää tehoa täytyisi nostaa, tulisi harkita suuremman poikkipinta-alan kaapelia.

Opinnäytetyöstä laaditusta tulostaulukosta ilmenee kuormitusvirtojen lisäksi kaapeleissa esiintyneet pätötehot, loistehot, näennäistehot sekä tehokertoimet. Tuloksien avulla taulukkoon on kirjattu jokaisen kaapelin kuormitettavuus, kuormitettavuusreservi sekä tehoreservi. Tulostaulukko tulee työn toimeksiantajan käyttöön, jolloin taulukkoa voidaan tarkastella kuormituksia nostaessa kaivosalueella.

LÄHDELUETTELO

- Anders George J. Rating of electric power cables. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc: New York. 1997. Viitattu 12.1.2024
- Elovaara, Jarmo & Haarla, Liisa, 2011. Sähköverkot 1, Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto.
- Elovaara, Jarmo & Haarla, Liisa, 2011. Sähköverkot 2, Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto.
- Enescu, Diana, Pietro Colella, Angela Russo, Radu F. Porumb, and George C. Seritan. 2021. "Concepts and Methods to Assess the Dynamic Thermal Rating of Underground Power Cables" *Energies* 14, no. 9:2591. <https://doi.org/10.3390/en14092591>. Viitattu 24.12.2023
- Heinhold, Lothar. 1990. Power Cables & their Application. Siemens aktiengesellschaft. https://www.scribd.com/document/325860878/Siemens-Power-Cables-Their-Applications?doc_id=325860878&order=625160811. Viitattu 13.1.2024
- IEC 60287-1-1. 2023. Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General.
- IEC 60287-2-1. 2023. Electric cables – Calculation of the current rating – Part 2-1: Thermal resistance – Calculation of thermal resistance.
- Lakervi, Erkki & Partanen, Jarmo 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto.
- Mustonen Heikki, 1995. Siilinjärven Kemiran tehtaiden 10,5 kV verkon syötöt
- Nokia Kaapeli. Voimakaapelit. Luettelo 02.01.01.13, kansio 2 ryhmä 1. 32 sivua. Ervaco / Kodaprint 4.83.
- Prysmian, 2024. <https://www.sahkonumerot.fi/0120261/>
- Reka Kaapeli Oy, 2024. datasheet C0275 <https://www.reka.fi/tuoteryhma/ahxcmk-hf-d-axqj-f-tt-d-tsl-i-d-12-20-24-kv-1-johdin-cas/>
- Reka Kaapeli Oy, 2024. datasheet C0305 <https://www.reka.fi/datasheet/category/C0305/?dl=1>
- Reka Kaapeli Oy, 2024. datasheet C0309 <https://www.reka.fi/datasheet/category/C0309/?dl=1>
- Reka Kaapeli Oy, 2024. datasheet C0350 <https://www.reka.fi/datasheet/category/C0350/?dl=1>
- Schlabbach, Juergen, Karl-Heinz Rofalski. Power System Engineering: Planning, Desing, and Operation of Power Systems and Equipment, John Wiley & Sons, Incorporated, 2014. ProQuest Ebook Central. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.savonia.fi/lib/savoniafi/detail.action?docID=1666551>. Viitattu 13.12.2023
- SFS 4680. (2015). Energiakaapelit. Voima- ja asennuskaapeleiden tyyppimerkinnät.

- SFS 5636. (2017). PEX-eristeiset 10, 20 ja 30 kV Al- ja Cu-voimakaapelit. Rakenne ja testaus.
- Simonen, Vesa-Matti. 2010. Keskijännitekaapeleiden Terminen Kuormitettavuus: Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
- Sähköturvallisuuskeskus 1989 Sähköturvallisuusmääräykset. Julkaisu A1-89. Helsinki. <https://tu-kes.fi/sahko/sahkotyöt-ja-urakointi/sahkoasennusten-tekniset-vaatimukset/vanhat-maaraykset>. Viitattu 12.01.2024
- Tele-fonika kable S.A. 2010. Johtimen ja kaapelit, luettelo. https://kesko-onninen-pim-resources-production.s3-eu-west-1.amazonaws.com/pimdocuments/FISTK_0611232_145510.pdf. Viitattu 02.01.2024
- Thue, William A. 1998 Electrical Power Cable Engineering. ProQuest Ebook Central. New York: CRC Press LLC. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.savonia.fi/lib/savoniafi/detail.action?docID=216100>. Viitattu 12.1.2024
- Vasama, Lauri. 2024. Reka Kaapeli Oy, Sähköpostikeskustelu 03.2024 aikana.
- Verkostosuositus SA 5:94. Keskijänniteverkon sähköinen mitoittaminen. Helsinki: Sähköenergialiitto ry SENER.
- Yara Suomi Oy 2017. Tietoa Yarasta. <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/>. Viitattu 27.11.2023.
- Yara Suomi Oy 2017. Tietoa Yarasta. <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/historia/>. Viitattu 27.11.2023.
- Yara Suomi Oy 2018. Tietoa Yarasta. <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/toimipaikat/sii-linjarvi/tuotantolaitos/>. Viitattu 27.11.2023.
- Yara Suomi Oy 2017. Yara lyhyesti. <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-lyhyesti/>. Viitattu 27.11.2023.

LIITE 1: SFS 5636 STANDARDIN LASKENNOISSA KÄYTETYT KUORMITETTAVUUSARVOT JA KORJAUSKERTOIMET

Liitteeseen 1 on koottu SFS 5636 standardin laskennoissa käytetyt kaapeleiden kuormitettavuusarvot ja korjauskertoimet asennustavoittain.

TAULUKKO 21. Suurimmat sallitut kuormitusvirrat PEX-eristeisille kolmijohtimisille kupari- tai alumiinikaapeleille (SFS 5636 2017, 50)

Nominal cross-section of conductor	Cu-conductor			Al-conductor		
	Cable laid in ground of 15 °C	Cable laid in ground of 15 °C	Cable laid in air of 25 °C	Cable laid in ground of 15 °C	Cable laid in ground of 15 °C	Cable laid in air of 25 °C
	Conductor temperature 40 °C	Conductor temperature 65 °C	Conductor temperature 90 °C	Conductor temperature 40 °C	Conductor temperature 65 °C	Conductor temperature 90 °C
mm ²	A	A	A	A	A	A
35	105	140	165	80	110	135
50	135	175	205	110	145	160
70	155	210	250	130	175	190
95	185	250	295	160	205	230
120	210	285	340	170	230	265
150	240	325	390	205	260	305
185	265	360	435	215	290	340
240	340	415	515	270	340	400
300	345	470	590	280	380	460

TAULUKKO 22. Suurimmat sallitut kuormitusvirrat PEX-eristeisille yksijohtimisille alumiinikaapeleille (SFS 5636 2017, 49)

Nominal cross-section of conductors	Cable laid in ground of 15 °C				Cable laid in ground of 15 °C				Cable laid in air of 25 °C (indoor and outdoor installation)			
	Conductor temperature 40 °C				Conductor temperature 65 °C				Conductor temperature 90 °C			
	Laying formation				Laying formation				Laying formation			
	flat		trefoil		flat		trefoil		flat		trefoil	
	screen circuit		screen circuit		screen circuit		screen circuit		screen circuit		screen circuit	
mm ²	open A	closed A	open A	closed A	open A	closed A	open A	closed A	open A	closed A	open A	closed A
25	90	90	80	80	125	125	110	110	140	135	125	125
35	110	110	100	100	150	150	135	135	175	170	155	155
50	130	125	115	115	175	170	155	155	210	205	195	195
70	165	160	150	150	220	215	205	200	265	255	235	235
95	190	185	170	170	255	250	240	235	320	310	285	280
120	220	210	200	195	295	280	270	265	370	350	330	325
150	245	235	225	220	330	315	305	300	425	395	380	370
185	275	260	255	245	375	350	345	330	485	440	430	425
240	320	300	290	285	435	395	395	385	570	515	505	490
300	360	330	330	320	485	440	445	435	650	580	580	565
400	420	370	390	375	570	500	525	510	790	680	695	680
500	475	420	435	420	645	550	590	570	920	755	800	775
630	530	465	490	470	720	610	665	635	1 040	840	915	880
800	595	500	535	525	805	650	725	695	1 220	950	1 045	1 010
1 000	665	530	595	580	900	700	800	760	1 390	1 060	1 170	1 130
1 200	715	580	635	615	970	740	860	810	1 540	1 160	1 290	1 230

TAULUKKO 23. Suurimmat sallitut kuormitusvirrat PEX-eristeisille yksijohtimisille kuparikaapeleille (SFS 5636 2017, 50)

Nominal cross-section of conductor	Cable laid in ground of 15 °C				Cable laid in ground of 15 °C				Cable laid in air of 25 °C (indoor and outdoor installation)			
	Conductor temperature 40 °C				Conductor temperature 65 °C				Conductor temperature 90 °C			
	Laying formation				Laying formation				Laying formation			
	flat		trefoil		flat		trefoil		flat		trefoil	
	screen circuit		screen circuit		screen circuit		screen circuit		screen circuit		screen circuit	
mm ²	open A	closed A	open A	closed A	open A	closed A	open A	closed A	open A	closed A	open A	closed A
25	115	115	105	105	155	155	145	145	180	175	160	160
35	145	140	130	130	195	185	175	175	220	215	200	195
50	165	160	150	150	225	220	205	205	265	235	255	250
70	205	200	190	190	280	270	255	255	340	320	300	295
95	245	235	220	220	330	315	295	295	410	380	360	355
120	275	255	250	245	375	345	340	335	470	430	420	410
150	315	285	285	280	425	385	385	380	520	480	480	465
185	350	315	320	315	475	425	435	425	615	535	545	535
240	405	360	370	360	545	485	500	485	725	615	640	620
300	460	390	420	405	620	530	570	545	820	685	730	705
400	530	435	475	460	720	590	645	625	1 000	785	870	835
500	600	475	535	515	810	645	725	695	1 150	870	985	940
630	665	515	595	560	900	700	805	755	1 300	960	1 115	1 035

TAULUKKO 24. APYAKMM-kaapelin suurimmat sallitut kuormitusvirrat (Nokia Kaapeli 1983.)

	3x185	3x240	3x300
ilmassa +25 °C, johdin +65 °C	270 A	315 A	360 A
maassa +15 °C, johdin +65 °C	290 A	335 A	375 A

TAULUKKO 25. Suurimmat sallitut kuormitusvirrat PAS-avojohdoille (Sener 1994, 37)

Johdin	Vaiheresistanssi (DC)		Vaihe-reaktanssi	Maakapasitanssi	Käyttökapasitanssi	Suurin sallittu kuormitusvirta	Suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta		Jäähtymisaikavakio
	Rv						Xv	Cm	
	Ω/ km	Ω/ km	Ω/ km	μF/km	μF/km	A			kA
	+20 °C 1)	+40 °C 2)	3)	4)	3)	5)	T1-liittimet	T2-liittimet	min
PAS 35	0,986	1,065	0,324	0,005	0,011	200	-	3,2	7
PAS 50	0,720	0,778	0,312	0,005	0,012	245	-	4,3	8
PAS 70	0,493	0,533	0,302	0,005	0,012	310	-	6,4	10
PAS 95	0,363	0,392	0,292	0,005	0,013	370	-	8,6	13
PAS 120	0,288	0,311	0,284	0,005	0,013	430	-	11	15
PAS 150	0,236	0,255	0,277	0,005	0,013	485	-	13,5	18
PAS 185	0,188	0,203	0,270	0,005	0,014	560	-	17	20

TAULUKKO 26. Suurimmat sallitut kuormitusvirrat Al -ilmajohdoille (Sener 1994, 36)

Johdin	Vaiheresistanssi (DC)		Vaihe-reaktanssi	Maakapasitanssi	Käyttökapasitanssi	Suurin sallittu kuormitusvirta	Suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta		Jäähtymisaikavakio
	Rv						Xv	Cm	
	Ω/ km	Ω/ km	Ω/ km	μF/km	μF/km	A			kA
	+20 °C 1)	+40 °C 2)	3)	4)	3)	5)	T1-liittimet	T2-liittimet	min
Al 25	1,16	1,25	0,397	0,0061	0,0092	170	2,1	-	3
Al 40	0,725	0,783	0,382	0,0061	0,0095	230	3,5	-	4
Al 62	0,459	0,496	0,368	0,0061	0,0099	305	5,6	-	6
Al 99	0,288	0,311	0,354	0,0061	0,010	415	8,7	-	8
Al 132	0,218	0,236	0,344	0,0061	0,011	495	11,6	-	10
Al 178	0,162	0,175	0,335	0,0061	0,011	600	15,6	-	13
Al 201	0,143	0,155	0,331	0,0061	0,011	645	17,7	-	15

TAULUKKO 27. Kaapeliin hätäkuormitettavuuden suhde kaapelin normaaliin maksimikuormitettavuuteen (Sener 1994, 7)

Kaapelityyppi	Johtimen maksimilämpötila hätäkuormituksella (°C)	Hätäkuormitettavuuskerroin	
		Kaapeli ilmassa +25 °C	Kaapeli maassa +15 °C
12-24 kV paperieristeinen	95	1,26	1,20
1-24 kV PEX-eristeinen	130	1,20	1,30

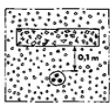
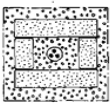
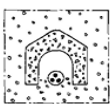
TAULUKKO 28. Korjauskertoimet kolmijohtimisten kaapeleiden tai yksijohtimisten kaapeliryhmien lukumäärän ja etäisyyksien mukaan suoraan maahan asennettuna (SFS 5636 2017, 51)

Mutual spacing between cables or groups of cables mm	Number of multicore cables or groups of single-core cables beside each other						
	2	3	4	5	6	8	10
0 (touching)	0,79	0,69	0,63	0,58	0,55	0,50	0,46
70	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53
250	0,87	0,79	0,75	0,72	0,69	0,66	0,64

TAULUKKO 29. Korjauskertoimet kolmijohtimisten kaapeleiden tai yksijohtimisten kaapeliryhmien lukumäärän ja etäisyyksien mukaan putkeen asennettuna (SFS 5636 2017, 52)

Mutual spacing between tubes mm	Number of tubes beside each other							
	1	2	3	4	5	6	8	10
0 (touching)	0,80	0,75	0,65	0,60	0,60	0,55	0,55	0,50
70		0,75	0,70	0,65	0,60	0,60	0,55	0,55
250		0,75	0,70	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65

TAULUKKO 30. Korjauskertoimet kaapelin betoni-, tiililaatta tai muovikouruasennuksissa (Sähkötar-
kastuskeskus 1989, 186)

Suojaustapa	Piirros	Korjauskerroin
Betoni- tai tiililaatta yli 0,1 m kaapelin yläpuolella hyvin tiivistetyssä hiekkamaassa		1,0
Tiilikivet joka puolella kaapelin suojana, välit täytetty tiiviisti hiekalla tai betonikouru kaapelin päällä, kourun ja kaapelin välissä tiivis hiekka		0,9
Betoni- tai muovikouru kaapelin päällä, kaapelin ja kourun välinen hiekkatäyte löysä		0,8

TAULUKKO 31. Korjauskertoimet kaapelin asennussyvyyden mukaan (SFS 5636 2017, 51)

Depth of laying, m	0,50 - 0,70	0,71 - 0,90	0,91 - 1,10	1,11 - 1,30	1,31 - 1,50
6-30 kV cables	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95

TAULUKKO 32. Korjauskertoimet eri maalajien lämpöresistiivisyksistä (SFS 5636 2017, 51)

Thermal resistivity of soil K.m/W	0,7	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0
Correction factor	1,10	1,00	0,92	0,85	0,75	0,69	0,63
Examples of thermal resistivities of soil:							
- dry sand (moisture content 0 %) 3,0 K.m/W				- semi-dry and moist gravel 1,0 K.m/W			
- dry gravel and clay 1,5 K.m/W				- moist clay and sand 0,7 K.m/W (moisture content 25 %)			

TAULUKKO 33. Korjauskertoimet maaperän lämpötilan ja johdinlämpötilan mukaan (SFS 5636 2017, 51)

Conductor temperature °C	Ground temperature °C										
	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
90	1,13	1,10	1,06	1,03	1,00	0,96	0,93	0,89	0,86	0,82	0,77
80	1,14	1,11	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78	0,73
70	1,17	1,13	1,09	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,73	0,67
65	1,18	1,14	1,10	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77	0,71	0,63

TAULUKKO 34. Korjauskertoimet kolmijohdinkaapeliryhmille ilma-asennuksissa (SFS 5636 2017, 55)

Type of laying		Mutual spacing = One cable diameter (d) Distance from the wall not less than 20 mm					Cables touching each other Cable in contact with the wall						
Number of cables		1	2	3	6	9	Figure	1	2	3	6	9	Figure
On floor		Correction factor					C1	Correction factor					D1
		0,95	0,90	0,88	0,85	0,84		0,90	0,84	0,80	0,75	0,73	
On metal trays (restricted air circulation)	Number of trays						C2						D2
	1	0,95	0,90	0,88	0,85	0,84		0,95	0,84	0,80	0,75	0,73	
	2	0,90	0,85	0,83	0,81	0,80		0,95	0,80	0,76	0,71	0,69	
	3	0,88	0,83	0,81	0,79	0,78		0,95	0,78	0,74	0,70	0,68	
	6	0,86	0,81	0,79	0,77	0,76		0,95	0,76	0,72	0,68	0,66	
On metal ladders	Number of ladders						C3						D3
	1	1,00	0,98	0,96	0,93	0,92		0,95	0,84	0,80	0,75	0,73	
	2	1,00	0,95	0,93	0,90	0,89		0,95	0,80	0,76	0,71	0,69	
	3	1,00	0,94	0,92	0,89	0,88		0,95	0,78	0,74	0,70	0,68	
	6	1,00	0,93	0,90	0,87	0,86		0,95	0,76	0,72	0,68	0,66	
On structures or on wall		1,00	0,93	0,90	0,87	0,86	C4	0,95	0,78	0,73	0,68	0,66	D4
Arrangement where reduction of current is not necessary		Number of cables laid one above the other is not restricted					C5	Number of cables laid side by side is not restricted					D5

TAULUKKO 35. Korjauskertoimet yksijohdinkaapeliryhmille ilma-asennuksissa (SFS 5636 2017, 53)

Type of laying		Cables laid in flat formation			Figure	Cables laid in trefoil formation			Figure
		Mutual spacing = one cable diameter (d) Distance from the wall not less than 20 mm				Mutual spacing = two cable diameters (2d) Distance from the wall not less than 20 mm			
Number of cables		1	2	3		1	2	3	
On floor		Correction factor			A1	Correction factor			B1
		0,92	0,89	0,88		0,95	0,90	0,88	
On metal trays (restricted air circulation)	Number of trays				A2				B2
	1	0,92	0,89	0,88		0,95	0,90	0,88	
	2	0,87	0,84	0,83		0,90	0,85	0,83	
	3	0,84	0,82	0,81		0,88	0,83	0,81	
On metal ladders	Number of ladders				A3				B3
	1	1,00	0,97	0,96		1,00	0,98	0,96	
	2	0,97	0,94	0,93		1,00	0,95	0,93	
	3	0,96	0,93	0,92		1,00	0,94	0,92	
On structures or on wall					A4				B4
		0,94	0,91	0,89		0,89	0,86	0,84	
Arrangement where reduction of current is not necessary		The cooling of cables in flat formation by increased spacing will get better while the losses in metallic screens will increase reducing the current-carrying capacity. Each case must be calculated separately.			B5				

TAULUKKO 36. Korjauskertoimet ympäröivän ilman vaikutuksesta (SFS 5636 2017, 52)

Conductor temperature °C	Ambient air temperature °C									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
90	1,12	1,08	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,74	0,68
80	1,14	1,09	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77	0,69	0,61
70	1,18	1,12	1,06	1,00	0,93	0,86	0,79	0,71	0,62	0,52
65	1,20	1,14	1,07	1,00	0,93	0,85	0,77	0,68	0,57	0,45

TAULUKKO 37. Metallien resistiivisyydet ja lämpötilakertoimet (IEC 60287-1-1)

Metallin ominaisuus	Johdin ja kosketussuoja		Metallivaippa ja armeeraus	
	Kupari	Alumiini	Lyijy	Alumiini
Resistiivisyys 20 °C $\Omega \cdot m$	$1,7241 \cdot 10^{-8}$	$2,8264 \cdot 10^{-8}$	$21,4 \cdot 10^{-8}$	$2,84 \cdot 10^{-8}$
Resistiivisyyden lämpötilakertoimet 20 °C	$3,93 \cdot 10^{-3}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$

TAULUKKO 38. Kertoimet k_s ja k_p (IEC 60287-2-1)

Kerroinarvo	Johdintyyppi			
	Alumiini		Kupari	
	Kerrattu	Milliken (5 sek.)	Kerrattu	Milliken (5 sek.)
k_s	1,0	0,190	1,0	0,435
k_p	1,0	0,370	1,0	0,370

TAULUKKO 39. Dielektrisyysvakion ja häviökertoimen arvoja (IEC 60287-2-1)

Type of cable	ϵ	$\tan \delta$
Cables insulated with impregnated paper		
Solid type, fully impregnated, preimpregnated, or mass-impregnated nondraining	4	0.01
Oil-filled, low-pressure		
up to $U_o = 36$ kV	3.6	0.0035
up to $U_o = 87$ kV	3.6	0.0033
up to $U_o = 160$ kV	3.5	0.0030
up to $U_o = 220$ kV	3.5	0.0028
Oil-pressure, pipe-type	3.7	0.0045
Internal gas-pressure	3.4	0.0045
External gas-pressure	3.6	0.0040
Cables with other kinds of insulation		
Butyl rubber	4	0.050
EPR, up to 18/30 kV	3	0.020
EPR, above 18/30 kV	3	0.005
PVC	8	0.1
PE (HD and LD)	2.3	0.001
XLPE up to and including 18/30 (36) kV, unfilled	2.5	0.004
XLPE above 18/30 (36) kV, unfilled	2.5	0.001
XLPE above 18/30 (36) kV, filled	3	0.005
Paper-polypropylene-paper (PPL)	2.8	0.001

TAULUKKO 40. Kaapelimateriaalien lämpöresistiivisyysarvoja (IEC 60287-2-1)

Materiaali	Lämpöresistiivisyys (Km/W)
Alumiini, kupari	0
PEX	3,5
PE	3,5
Paisuva nauha	6

LIITE 2: KUORMITETTAVUUSLASKELMAT IEC 60287 -STANDARDIN MUKAISESTI

Kuormitettavuuslaskelma AHXAMK-W 3x240+70Cu keskijännitekaapelille (20 kV)**Johtimen lämpötilannousu ympäristöön nähden**

$$\Delta\theta = 90^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C} = 75^\circ\text{C} = 348.15\text{ K}$$

Johtimen vaihtovirtaresistanssi käyttölämpötilassa

$$R = R'[1 + 1,5(y_s + y_p)]$$

Johtimen tasavirtaresistanssi käyttölämpötilassa

$$R' = R_0[1 + \alpha_{20}(\theta_c - 20^\circ\text{C})]$$

Johtimen tasavirtaresistanssi 20 °C käyttölämpötilassa

$$R_0 = 0,000125\ (\Omega/m)$$

$$\rightarrow R' = 0,000125(1 + 4,03 \cdot 10^{-3}(90^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})) = 1,603 \cdot 10^{-4}\ (\Omega/m)$$

Pintavaikutussilmiotä kuvaava tekijä y_s

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4}$$

missä x_s ,

$$x_s = \sqrt{\frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7} k_s} = \sqrt{\frac{8\pi \cdot 50}{1,603 \cdot 10^{-4}} \cdot 10^{-7} \cdot 1,0} = 0,885$$

$$\rightarrow y_s = \frac{0,885^4}{192 + 0,8 \cdot 0,885^4} = 3,187 \cdot 10^{-3}$$

Lähivaikutussilmiotä kuvaava tekijä y_p

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \left[0,312 \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} + 0,27} \right]$$

missä x_p ,

$$x_p = \sqrt{\frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7} k_p} = \sqrt{\frac{8\pi \cdot 50}{1,603 \cdot 10^{-4}} \cdot 10^{-7} \cdot 1,0} = 0,885$$

$$\begin{aligned} \rightarrow y_p &= \frac{0,885^4}{192 + 0,8 \cdot 0,885^4} \cdot \left(\frac{17,8}{38}\right)^2 \left[0,312 \cdot \left(\frac{17,8}{38}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{0,885^4}{192 + 0,8 \cdot 0,885^4} + 0,27} \right] \\ &= 3,07 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\rightarrow R = 1,603 \cdot 10^{-4} (1 + 1,5(3,187 \cdot 10^{-3} + 3,07 \cdot 10^{-3})) = 1,618 \cdot 10^{-4}\ (\Omega/m)$$

Dielektriset häviöt

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta$$

Johtimen kapasitanssi C,

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \ln \left(\frac{D_i}{d_{cs}} \right)} 10^{-9}$$

$$\rightarrow C = \frac{2,5}{18 \ln \left(\frac{29,8}{18,8} \right)} 10^{-9} = 3,015 \cdot 10^{-10} \text{ (F/m)}$$

$$\rightarrow W_d = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3,015 \cdot 10^{-10} \cdot \left(\frac{24}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 \right)^2 \cdot 0,004 = 0,0727 \text{ (W/m)}$$

Kosketussuojan häviöt

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1$$

Kosketussuojan kiertävien virtojen häviöiden suhde johdinhäviöihin,

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2}$$

Kosketussuojan reaktanssi X,

$$X = 2\omega 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) = 2 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 10^{-7} \ln \left(\frac{2 \cdot 38}{31,8} \right) = 5,474 \cdot 10^{-5} \text{ (\Omega/m)}$$

Kosketussuojan resistanssi käyttölämpötilassa,

$$R_s = R_{s0} [1 + \alpha_{20} (\Theta_{sc} - 20)]$$

Kosketussuojan resistanssi 20 °C käyttölämpötilassa,

$$R_{s0} = \rho_{Al} \cdot \frac{l_{sc}}{A_{sc}} = 2,8264 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{70 \cdot 10^{-6}} = 4,037 \cdot 10^{-4} \text{ (\Omega/m)}$$

$$\rightarrow R_s = 4,037 \cdot 10^{-4} [1 + 4,03 \cdot 10^{-3} (90 - 20)] = 5,176 \cdot 10^{-4} \text{ (\Omega/m)}$$

$$\rightarrow \lambda'_1 = \frac{5,176 \cdot 10^{-4}}{1,618 \cdot 10^{-4}} \frac{1}{1 + \left(\frac{5,176 \cdot 10^{-4}}{5,474 \cdot 10^{-5}} \right)^2} = 3,538 \cdot 10^{-2}$$

Lämpöresistanssit**Kaapelin eristyksen lämpöresistanssi**

$$T_1 = \frac{\rho_1}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_1}{d_c} \right) = \frac{3,5}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2 \cdot 6,5}{17,8} \right) = 0,305 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Kolmijohtimiselle kolmioon asennetuille kaapeleille kerroin on 1,07

$$\rightarrow T_1 = 1,07 \cdot 0,305 = 0,326 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Ulkovaipan lämpöresistanssi

$$T_3 = \frac{\rho_3}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_3}{d_s}\right) = \frac{3,5}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2 \cdot 3,1}{31,8}\right) = 9,922 \cdot 10^{-2} \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Kolmijohtimiselle kolmioon asennetuille kaapeleille kerroin on 1,6

$$\rightarrow T_3 = 1,6 \cdot 9,108 \cdot 10^{-2} = 0,158 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Ulkoiset lämpöresistiivisyydet**Kaapelin ja muoviputken välinen lämpöresistiivisyys**

$$T_{4C\&D} = \frac{U}{1 + 0,1(V + Y\Theta_m)D_e} = \frac{1,87}{1 + 0,1(0,312 + 0,0037 \cdot 40)81,7} = 0,393 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Putken lämpöresistiivisyys

$$T_{4D} = \frac{pt}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{D_0}{D_d}\right) = \frac{3,5}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{160}{140}\right) = 7,438 \cdot 10^{-2} \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Muoviputken ja teräsputken välinen lämpöresistiivisyys

$$T_{4D\&S} = \frac{U}{1 + 0,1(V + Y\Theta_m)D_e} = \frac{5,2}{1 + 0,1(1,4 + 0,011 \cdot 20)160} = 1,447 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Teräsputken lämpöresistiivisyys

$$T_{4S} = \frac{pt}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{D_0}{D_d}\right) = \frac{0,0017}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{200}{180}\right) = 2,851 \cdot 10^{-5} \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Maaperän lämpöresistiivisyys

$$T_{4Soil} = \frac{1,5}{2\pi} \rho_4 [\ln(2u) - 0,630] = \frac{1,5}{2\pi} 3,5 [\ln(2 \cdot 47,96) - 0,630] = 3,287 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

$$\rightarrow T_4 = T_{4C\&D} + T_{4D} + T_{4D\&S} + T_{4S} + T_{4Soil}$$

$$= 0,393 + 7,438 \cdot 10^{-2} + 1,447 + 2,851 \cdot 10^{-5} + 3,287 = 5,201 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

$\Delta\theta$	348.15 K
R	$1,618 \cdot 10^{-4}$
W_d	0,0727
λ_1	$3,538 \cdot 10^{-2}$
λ_2	0
n	3
T_1	0,326
T_2	0
T_3	0,158
T_4	5,201

Kaapelin kuormitettavuus

$$I = \left[\frac{348,15 - 0,0727[0,5 \cdot 0,326 + 3(0 + 0,158 + 5,201)]}{1,618 \cdot 10^{-4}[0,326 + 3(1 + 3,538 \cdot 10^{-2})0 + 3(1 + 3,538 \cdot 10^{-2} + 0)(0,158 + 5,201)]} \right]^{0,5}$$

$$= 355 \text{ A}$$

Kuormitettavuuslaskelma AHXAMK-W 3x240+70Cu keskijännitekaapelille (10 kV)**Johtimen lämpötilannousu ympäristöön nähden**

$$\Delta\theta = 90^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C} = 75^\circ\text{C} = 348.15\text{ K}$$

Johtimen vaihtovirtaresistanssi käyttölämpötilassa

$$R = R'[1 + 1,5(y_s + y_p)]$$

Johtimen tasavirtaresistanssi käyttölämpötilassa

$$R' = R_0[1 + \alpha_{20}(\theta_c - 20^\circ\text{C})]$$

Johtimen tasavirtaresistanssi 20 °C käyttölämpötilassa

$$R_0 = 0,000125 (\Omega/m)$$

$$\rightarrow R' = 0,000125(1 + 4,03 \cdot 10^{-3}(90^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})) = 1,603 \cdot 10^{-4} (\Omega/m)$$

Pintavaikutusilmiötä kuvaava tekijä y_s

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4}$$

missä x_s ,

$$x_s = \sqrt{\frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7} k_s} = \sqrt{\frac{8\pi \cdot 50}{1,603 \cdot 10^{-4}} \cdot 10^{-7} \cdot 1,0} = 0,885$$

$$\rightarrow y_s = \frac{0,885^4}{192 + 0,8 \cdot 0,885^4} = 3,187 \cdot 10^{-3}$$

Lähivaikutusilmiötä kuvaava tekijä y_p

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \left[0,312 \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} + 0,27} \right]$$

missä x_p ,

$$x_p = \sqrt{\frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7} k_p} = \sqrt{\frac{8\pi \cdot 50}{1,603 \cdot 10^{-4}} \cdot 10^{-7} \cdot 1,0} = 0,885$$

$$\rightarrow y_p = \frac{0,885^4}{192 + 0,8 \cdot 0,885^4} \cdot \left(\frac{17,8}{38}\right)^2 \left[0,312 \cdot \left(\frac{17,8}{38}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{0,885^4}{192 + 0,8 \cdot 0,885^4} + 0,27} \right]$$

$$= 3,07 \cdot 10^{-3}$$

$$\rightarrow R = 1,603 \cdot 10^{-4} \left(1 + 1,5(3,187 \cdot 10^{-3} + 3,07 \cdot 10^{-3})\right) = 1,618 \cdot 10^{-4} (\Omega/m)$$

Dielektriset häviöt

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta$$

Johtimen kapasitanssi C,

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \ln \left(\frac{D_i}{d_{cs}} \right)} 10^{-9}$$

$$\rightarrow C = \frac{2,5}{18 \ln \left(\frac{29,8}{18,8} \right)} 10^{-9} = 3,015 \cdot 10^{-10} \text{ (F/m)}$$

$$\rightarrow W_d = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3,015 \cdot 10^{-10} \cdot \left(\frac{12}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 \right)^2 \cdot 0,004 = 0,0182 \text{ (W/m)}$$

Kosketussuojan häviöt

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1$$

Kosketussuojan kiertävien virtojen häviöiden suhde johdinhäviöihin,

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2}$$

Kosketussuojan reaktanssi X,

$$X = 2\omega 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) = 2 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 10^{-7} \ln \left(\frac{2 \cdot 38}{31,8} \right) = 5,474 \cdot 10^{-5} \text{ (\Omega/m)}$$

Kosketussuojan resistanssi käyttölämpötilassa,

$$R_s = R_{s0} [1 + \alpha_{20} (\Theta_{sc} - 20)]$$

Kosketussuojan resistanssi 20 °C käyttölämpötilassa,

$$R_{s0} = \rho_{Al} \cdot \frac{l_{sc}}{A_{sc}} = 2,8264 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{70 \cdot 10^{-6}} = 4,037 \cdot 10^{-4} \text{ (\Omega/m)}$$

$$\rightarrow R_s = 4,037 \cdot 10^{-4} [1 + 4,03 \cdot 10^{-3} (90 - 20)] = 5,176 \cdot 10^{-4} \text{ (\Omega/m)}$$

$$\rightarrow \lambda'_1 = \frac{5,176 \cdot 10^{-4}}{1,618 \cdot 10^{-4}} \frac{1}{1 + \left(\frac{5,176 \cdot 10^{-4}}{5,474 \cdot 10^{-5}} \right)^2} = 3,538 \cdot 10^{-2}$$

Lämpöresistanssit**Kaapelin eristyksen lämpöresistanssi**

$$T_1 = \frac{\rho_1}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_1}{d_c} \right) = \frac{3,5}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2 \cdot 6,5}{17,8} \right) = 0,305 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Kolmijohtimiselle kolmioon asennetuille kaapeleille kerroin on 1,07

$$\rightarrow T_1 = 1,07 \cdot 0,305 = 0,326$$

Ulkovaipan lämpöresistanssi

$$T_3 = \frac{\rho_3}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_3}{d_s}\right) = \frac{3,5}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2 \cdot 3,1}{31,8}\right) = 9,922 \cdot 10^{-2} \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Kolmijohtimiselle kolmioon asennetuille kaapeleille kerroin on 1,6

$$\rightarrow T_3 = 1,6 \cdot 9,108 \cdot 10^{-2} = 0,158 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Ulkoiset lämpöresistiivisyydet**Kaapelin ja muoviputken välinen lämpöresistiivisyys**

$$T_{4C\&D} = \frac{U}{1 + 0,1(V + Y\Theta_m)D_e} = \frac{1,87}{1 + 0,1(0,312 + 0,0037 \cdot 40)81,7} = 0,393 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Putken lämpöresistiivisyys

$$T_{4D} = \frac{pt}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{D_0}{D_d}\right) = \frac{3,5}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{160}{140}\right) = 7,438 \cdot 10^{-2} \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Muoviputken ja teräsputken välinen lämpöresistiivisyys

$$T_{4D\&S} = \frac{U}{1 + 0,1(V + Y\Theta_m)D_e} = \frac{5,2}{1 + 0,1(1,4 + 0,011 \cdot 20)160} = 1,447 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Teräsputken lämpöresistiivisyys

$$T_{4S} = \frac{pt}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{D_0}{D_d}\right) = \frac{0,0017}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{200}{180}\right) = 2,851 \cdot 10^{-5} \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Maaperän lämpöresistiivisyys

$$T_{4Soil} = \frac{1,5}{2\pi} \rho_4 [\ln(2u) - 0,630] = \frac{1,5}{2\pi} 3,5 [\ln(2 \cdot 47,96) - 0,630] = 3,287 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

$$\rightarrow T_4 = T_{4C\&D} + T_{4D} + T_{4D\&S} + T_{4S} + T_{4Soil}$$

$$= 0,393 + 7,438 \cdot 10^{-2} + 1,447 + 2,851 \cdot 10^{-5} + 3,287 = 5,201 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

$\Delta\theta$	348.15 K
R	$1,618 \cdot 10^{-4}$
W_d	0,0182
λ_1	$3,538 \cdot 10^{-2}$
λ_2	0
n	3
T_1	0,326
T_2	0
T_3	0,158
T_4	5,201

Kaapelin kuormitettavuus

$$I = \left[\frac{348,15 - 0,0182[0,5 \cdot 0,326 + 3(0 + 0,158 + 5,201)]}{1,618 \cdot 10^{-4}[0,326 + 3(1 + 3,538 \cdot 10^{-2})0 + 3(1 + 3,538 \cdot 10^{-2} + 0)(0,158 + 5,201)]} \right]^{0,5}$$

$$= 356 \text{ A}$$

Kuormitettavuuslaskelma AHXAMK-W 3x185+35Cu keskijännitekaapelille (10 kV)**Johtimen lämpötilannousu ympäristöön nähden**

$$\Delta\theta = 90^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C} = 75^\circ\text{C} = 348.15\text{ K}$$

Johtimen vaihtovirtaresistanssi käyttölämpötilassa

$$R = R'[1 + 1,5(y_s + y_p)]$$

Johtimen tasavirtaresistanssi käyttölämpötilassa

$$R' = R_0[1 + \alpha_{20}(\theta_c - 20^\circ\text{C})]$$

Johtimen tasavirtaresistanssi 20 °C käyttölämpötilassa

$$R_0 = 0,000164 (\Omega/m)$$

$$\rightarrow R' = 0,000164(1 + 4,03 \cdot 10^{-3}(90^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})) = 2,10 \cdot 10^{-4} (\Omega/m)$$

Pintavaikutusilmiötä kuvaava tekijä y_s

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4}$$

missä x_s ,

$$x_s = \sqrt{\frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7} k_s} = \sqrt{\frac{8\pi \cdot 50}{2,10 \cdot 10^{-4}} \cdot 10^{-7} \cdot 1,0} = 0,773$$

$$\rightarrow y_s = \frac{0,773^4}{192 + 0,8 \cdot 0,773^4} = 1,856 \cdot 10^{-3}$$

Lähivaikutusilmiötä kuvaava tekijä y_p

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \left[0,312 \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} + 0,27} \right]$$

missä x_p ,

$$x_p = \sqrt{\frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7} k_p} = \sqrt{\frac{8\pi \cdot 50}{2,10 \cdot 10^{-4}} \cdot 10^{-7} \cdot 1,0} = 0,773$$

$$\rightarrow y_p = \frac{0,773^4}{192 + 0,8 \cdot 0,773^4} \cdot \left(\frac{15,6}{35}\right)^2 \left[0,312 \cdot \left(\frac{15,6}{35}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{0,773^4}{192 + 0,8 \cdot 0,773^4} + 0,27} \right]$$

$$= 0,868$$

$$\rightarrow R = 2,10 \cdot 10^{-4} (1 + 1,856 \cdot 10^{-3} + 0,868) = 3,926 \cdot 10^{-4} (\Omega/m)$$

Dielektriset häviöt

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta$$

Johtimen kapasitanssi C,

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \ln \left(\frac{D_i}{d_{cs}} \right)} 10^{-9}$$

$$\rightarrow C = \frac{2,5}{18 \ln \left(\frac{27,6}{16,6} \right)} 10^{-9} = 2,732 \cdot 10^{-10} \text{ (F/m)}$$

$$\rightarrow W_d = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2,732 \cdot 10^{-10} \cdot \left(\frac{12}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 \right)^2 \cdot 0,004 = 1,647 \cdot 10^{-2} \text{ (W/m)}$$

Kosketussuojan häviöt

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1$$

Kosketussuojan kiertävien virtojen häviöiden suhde johdinhäviöihin,

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2}$$

Kosketussuojan reaktanssi X,

$$X = 2\omega 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) = 2 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 10^{-7} \ln \left(\frac{2 \cdot 35}{29} \right) = 5,536 \cdot 10^{-5} \text{ (\Omega/m)}$$

Kosketussuojan resistanssi käyttölämpötilassa,

$$R_s = R_{s0} [1 + \alpha_{20} (\theta_{sc} - 20)]$$

Kosketussuojan resistanssi 20 °C käyttölämpötilassa,

$$R_{s0} = \rho_{al} \cdot \frac{l_{sc}}{A_{sc}} = 2,8264 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{35 \cdot 10^{-6}} = 8,075 \cdot 10^{-4} \text{ (\Omega/m)}$$

$$\rightarrow R_s = 8,075 \cdot 10^{-4} [1 + 4,03 \cdot 10^{-3} (90 - 20)] = 1,035 \cdot 10^{-3} \text{ (\Omega/m)}$$

$$\rightarrow \lambda'_1 = \frac{1,035 \cdot 10^{-3}}{3,926 \cdot 10^{-4}} \frac{1}{1 + \left(\frac{1,035 \cdot 10^{-3}}{5,536 \cdot 10^{-5}} \right)^2} = 4,735 \cdot 10^{-3}$$

Lämpöresistanssit**Kaapelin eristyksen lämpöresistanssi**

$$T_1 = \frac{\rho_1}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_1}{d_c} \right) = \frac{3,5}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2 \cdot 6,5}{15,6} \right) = 0,337 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Kolmijohtimiselle kolmioon asennetuille kaapeleille kerroin on 1,07

$$\rightarrow T_1 = 1,07 \cdot 0,337 = 0,361 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Ulkovaipan lämpöresistanssi

$$T_3 = \frac{\rho_3}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_3}{d_s}\right) = \frac{3,5}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2 \cdot 3,0}{29}\right) = 0,105 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Kolmijohtimiselle kolmioon asennetuille kaapeleille kerroin on 1,6

$$\rightarrow T_3 = 1,6 \cdot 0,105 = 0,168 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Ulkoiset lämpöresistiivisyydet

Kaapelin ja muoviputken välinen lämpöresistiivisyys

$$T_{4C\&D} = \frac{U}{1 + 0,1(V + Y\Theta_m)D_e} = \frac{1,87}{1 + 0,1(0,312 + 0,0037 \cdot 40)76} = 0,420 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Putken lämpöresistiivisyys

$$T_{4D} = \frac{pt}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{D_0}{D_d}\right) = \frac{3,5}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{160}{140}\right) = 7,438 \cdot 10^{-2} \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Muoviputken ja teräsputken välinen lämpöresistiivisyys

$$T_{4D\&S} = \frac{U}{1 + 0,1(V + Y\Theta_m)D_e} = \frac{5,2}{1 + 0,1(1,4 + 0,011 \cdot 20)160} = 1,447 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Teräsputken lämpöresistiivisyys

$$T_{4S} = \frac{pt}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{D_0}{D_d}\right) = \frac{0,0017}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{200}{180}\right) = 2,851 \cdot 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{m/W}$$

Maaperän lämpöresistiivisyys

$$T_{4Soil} = \frac{1,5}{2\pi} \rho_4 [\ln(2u) - 0,630] = \frac{1,5}{2\pi} 3,5 [\ln(2 \cdot 51,6) - 0,630] = 3,347 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

$$\rightarrow T_4 = T_{4C\&D} + T_{4D} + T_{4D\&S} + T_{4S} + T_{4Soil}$$

$$= 0,420 + 7,438 \cdot 10^{-2} + 1,447 + 2,851 \cdot 10^{-5} + 3,347 = 5,288 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

$\Delta\theta$	348.15 K
R	$3,926 \cdot 10^{-4}$
W_d	$1,647 \cdot 10^{-2}$
λ_1	$4,735 \cdot 10^{-3}$
λ_2	0
n	3
T_1	0,361
T_2	0
T_3	0,168
T_4	5,288

Kaapelin kuormitettavuus

$$I = \left[\frac{348,15 - 1,647 \cdot 10^{-2} [0,5 \cdot 0,361 + 3(0 + 0,168 + 5,228)]}{3,926 \cdot 10^{-4} [0,361 + 3(1 + 4,735 \cdot 10^{-3})0 + 3(1 + 4,735 \cdot 10^{-3} + 0)(0,168 + 5,228)]} \right]^{0,5}$$

$$= 229 \text{ A}$$

Kuormitettavuuslaskelma AHXAMK-W 3x185+35Cu keskijännitekaapelille sumppitunne- liin (10 kV)

Johtimen lämpötilannousu ympäristöön nähden

$$\Delta\theta = 90^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C} = 75^\circ\text{C} = 348.15\text{ K}$$

Johtimen vaihtovirtaresistanssi käyttölämpötilassa

$$R = R'[1 + 1,5(y_s + y_p)]$$

Johtimen tasavirtaresistanssi käyttölämpötilassa

$$R' = R_0[1 + \alpha_{20}(\theta_c - 20^\circ\text{C})]$$

Johtimen tasavirtaresistanssi 20 °C käyttölämpötilassa

$$R_0 = 0,000164 (\Omega/m)$$

$$\rightarrow R' = 0,000164(1 + 4,03 \cdot 10^{-3}(90^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})) = 2,10 \cdot 10^{-4} (\Omega/m)$$

Pintavaikutusilmiötä kuvaava tekijä y_s

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4}$$

missä x_s ,

$$x_s = \sqrt{\frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7} k_s} = \sqrt{\frac{8\pi \cdot 50}{2,10 \cdot 10^{-4}} \cdot 10^{-7} \cdot 1,0} = 0,773$$

$$\rightarrow y_s = \frac{0,773^4}{192 + 0,8 \cdot 0,773^4} = 1,856 \cdot 10^{-3}$$

Lähivaikutusilmiötä kuvaava tekijä y_p

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \left[0,312 \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} + 0,27} \right]$$

missä x_p ,

$$x_p = \sqrt{\frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7} k_p} = \sqrt{\frac{8\pi \cdot 50}{2,10 \cdot 10^{-4}} \cdot 10^{-7} \cdot 1,0} = 0,773$$

$$\rightarrow y_p = \frac{0,773^4}{192 + 0,8 \cdot 0,773^4} \cdot \left(\frac{15,6}{35}\right)^2 \left[0,312 \cdot \left(\frac{15,6}{35}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{0,773^4}{192 + 0,8 \cdot 0,773^4} + 0,27} \right]$$

$$= 0,868$$

$$\rightarrow R = 2,10 \cdot 10^{-4} (1 + 1,856 \cdot 10^{-3} + 0,868) = 3,926 \cdot 10^{-4} (\Omega/m)$$

Dielektriset häviöt

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta$$

Johtimen kapasitanssi C,

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \ln \left(\frac{D_i}{d_{cs}} \right)} 10^{-9}$$

$$\rightarrow C = \frac{2,5}{18 \ln \left(\frac{27,6}{16,6} \right)} 10^{-9} = 2,732 \cdot 10^{-10} \text{ (F/m)}$$

$$\rightarrow W_d = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2,732 \cdot 10^{-10} \cdot \left(\frac{12}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 \right)^2 \cdot 0,004 = 1,647 \cdot 10^{-2} \text{ (W/m)}$$

Kosketussuojan häviöt

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1$$

Kosketussuojan kiertävien virtojen häviöiden suhde johdinhäviöihin,

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2}$$

Kosketussuojan reaktanssi X,

$$X = 2\omega 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) = 2 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 10^{-7} \ln \left(\frac{2 \cdot 35}{29} \right) = 5,536 \cdot 10^{-5} \text{ (}\Omega/m\text{)}$$

Kosketussuojan resistanssi käyttölämpötilassa,

$$R_s = R_{s0} [1 + \alpha_{20} (\theta_{sc} - 20)]$$

Kosketussuojan resistanssi 20 °C käyttölämpötilassa,

$$R_{s0} = \rho_{al} \cdot \frac{l_{sc}}{A_{sc}} = 2,8264 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{35 \cdot 10^{-6}} = 8,075 \cdot 10^{-4} \text{ (}\Omega/m\text{)}$$

$$\rightarrow R_s = 8,075 \cdot 10^{-4} [1 + 4,03 \cdot 10^{-3} (90 - 20)] = 1,035 \cdot 10^{-3} \text{ (}\Omega/m\text{)}$$

$$\rightarrow \lambda'_1 = \frac{1,035 \cdot 10^{-3}}{3,926 \cdot 10^{-4}} \frac{1}{1 + \left(\frac{1,035 \cdot 10^{-3}}{5,536 \cdot 10^{-5}} \right)^2} = 4,735 \cdot 10^{-3}$$

Lämpöresistanssit**Kaapelin eristyksen lämpöresistanssi**

$$T_1 = \frac{\rho_1}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_1}{d_c} \right) = \frac{3,5}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2 \cdot 6,5}{15,6} \right) = 0,337 \text{ (K} \cdot m/W\text{)}$$

Kolmijohtimiselle kolmioon asennetuille kaapeleille kerroin on 1,07

$$\rightarrow T_1 = 1,07 \cdot 0,337 = 0,361 \text{ (K} \cdot m/W\text{)}$$

Ulkovaipan lämpöresistanssi

$$T_3 = \frac{\rho_3}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_3}{d_s}\right) = \frac{3,5}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2 \cdot 3,0}{29}\right) = 0,105 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Kolmijohtimiselle kolmioon asennetuille kaapeleille kerroin on 1,6

$$\rightarrow T_3 = 1,6 \cdot 0,105 = 0,168 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Ulkoiset lämpöresistiivisyydet**Kaapelin ja teräsputken välinen lämpöresistiivisyys**

$$T_{4c\&s} = \frac{U}{1 + 0,1(V + Y\theta_m)D_e} = \frac{5,2}{1 + 0,1(1,4 + 0,011 \cdot 40)76} = 0,347 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Teräsputken lämpöresistiivisyys

$$T_{4s} = \frac{pt}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{D_0}{D_d}\right) = \frac{0,0017}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{200}{180}\right) = 2,851 \cdot 10^{-5} \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

Maaperän lämpöresistiivisyys

$$T_{4soil} = \frac{1,5}{2\pi} \rho_4 [\ln(2u) - 0,630] = \frac{1,5}{2\pi} 3 [\ln(2 \cdot 51,6) - 0,630] = 2,869 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

$$\rightarrow T_4 = T_{4c\&s} + T_{4s} + T_{4soil}$$

$$= 0,347 + 2,851 \cdot 10^{-5} + 2,869 = 3,216 \text{ (K} \cdot \text{m/W)}$$

$\Delta\theta$	348.15 K
R	$3,926 \cdot 10^{-4}$
W_d	$1,647 \cdot 10^{-2}$
λ_1	$4,735 \cdot 10^{-3}$
λ_2	0
n	3
T_1	0,361
T_2	0
T_3	0,168
T_4	3,216

Kaapelin kuormitettavuus

$$I = \left[\frac{348,15 - 1,647 \cdot 10^{-2} [0,5 \cdot 0,361 + 3(0 + 0,168 + 3,216)]}{3,926 \cdot 10^{-4} [0,361 + 3(1 + 4,735 \cdot 10^{-3})0 + 3(1 + 4,735 \cdot 10^{-3} + 0)(0,168 + 3,216)]} \right]^{0,5}$$

$$= 289 \text{ A}$$