

VAASAN YLIOPISTO

TEKNIIKAN JA INNOVAATIOJOHTAMISEN YKSIKKÖ

SÄHKÖTEKNIikka

Mikko Ojala

ALUMIINIKÄÄMITYKSISEN OIKOSULKUMOOTTORIN SÄHKÖISET LIITOKSET

Työ on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 24.11.2019

Työn valvoja

Timo Vekara

Työn ohjaaja

Tero Käsäkangas

Työn tarkastaja

Jere Kolehmainen

ALKULAUSE

Tämä työ on tehty ABB oy:n Motors & Generators -yksikön Vaasan tuotekehitysosastolle.

Haluan kiittää työni ohjaajaa Tero Käsäkangasta mielenkiintoisesta aiheesta ja ohjauksesta työn aikana. Lisäksi haluan kiittää Tapio Ölingia suuresta avusta koekappaleiden valmistuksessa. Kiitoksen ansaitsevat myös kaikki muut työn aikana avustaneet henkilöt. Haluan kiittää myös valvojaani professori Timo Vekaraa ja yliopiston dosenttia Jere Kolehmainen työn tarkastamisesta.

Tätä työtä tehdessäni olen työskennellyt samaan aikaan kokopäiväisesti, osallistunut vapaaehtoiseen meripelastustoimintaan ja toiminut isänä työn aikana syntyneelle pojalleni. Haluan esittää suuren kiitoksen vaimolleni, joka on urheasti jaksanut tämän karusellin pyörteissä.

Vaasassa 24.11.2019

Mikko Ojala

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	2
SISÄLLYSLUETTELO	3
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	5
TIIVISTELMÄ	7
ABSTRACT	8
1 JOHDANTO	9
2 OIKOSULKUMOOTTORIN RAKENNE JA HÄVIÖT	12
2.1 Staattorin ja roottorin rakenne	12
2.2 Staattorikäämityksen rakenne	13
2.3 Käämien asettelu staattoriin	15
2.4 Käämien kytkentä	17
2.5 Oikosulkumoottorin häviöt	18
3 KUPARI JA ALUMIINI JOHDINMATERIAALEINA	21
3.1 Kuparin ja alumiinin ominaisuudet	21
3.2 Kuparin ja alumiinin keskeiset eroavaisuudet	22
4 SÄHKÖISET LIITOKSET	24
5 SÄHKÖISIIN LIITOKSIIN HEIKENTÄVÄSTI VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	27
5.1 Ympäristövaikutukset sähköisiin liitoksiin	28
5.2 Galvaaninen korroosio sähköisissä liitoksissa	29
5.3 Piste- ja rakokorroosio sähköisissä liitoksissa	32

5.4	Hankauskorrosio sähköisissä liitoksissa	33
5.5	Muita yleisiä korroosiotyyppejä liitoksissa ja pinnoilla	33
6	KAAPELIKENGÄT, JATKOHOLKIT JA LIITOSMENETELMÄT	34
6.1	Alumiinijohtimelle tarkoitetut kaapelikengät ja jatkoholkit	36
6.2	Hot crimping -menetelmä	40
6.3	Ultraäänihitsaus	41
6.4	Standardien asettamia vaatimuksia kaapelikenkien liitoksille	43
7	KOEKAPPALEIDEN VETO- JA LÄMPÖVANHENNUSKOKEET	47
7.1	Koekappaleiden lämpövanhennuskokeet	48
7.1.1	Resistanssin mittaus koekappaleista	51
7.1.2	Lämpövanhennus ja resistanssien uudelleen mittaus	54
7.1.3	Lämpövanhennuskokeen tulosten analysointi	59
7.2	Vetokokeet koekappaleille	60
7.2.1	Koekappaleiden vetokokeiden tulokset	62
7.2.2	Koekappaleiden vetokoetulosten analysointi	79
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	82
	LÄHDELUETTELO	85

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Kreikkalaiset symbolit

η	hyötysuhde
ρ	resistiivisyys (Ωm)
σ	johtavuus (S/m)
τ_p	napajako
τ_v	vyöhykejako

Muut Symbolit

A	pinta-ala (m^2)
a	säde (m)
f	taajuus (Hz)
I	sähkövirran voimakkuus (A)
l	pituus (m)
m	napapariluku
P	teho (W)
P_{in}	ottoteho (W)
P_{loss}	häviöteho (W)
P_{out}	antoteho (W)
p	napapariluku
Q	staattorin urauku
q	vakoluku

R	resistanssi (Ω)
R_c	liitospinnan resistanssi (Ω)
R_m	johteen resistanssi (Ω)
S	johtimen poikkipinta-ala (mm^2)

Lyhenteet

Al	alumiini
Cu	kupari
ETP	electrolytic Tough Pitch Copper suom. elektrolyyttisesti puhdistettu kupari eli sitkokupari

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

Tekijä:	Mikko Ojala
Diplomityön nimi:	Alumiinikäämityksisen oikosulkumoottorin sähköiset liitokset
Valvoja:	Timo Vekara
Ohjaaja:	Tero Känsäkangas
Tarkastaja:	Jere Kolehmainen
Tutkinto:	Diplomi-insinööri
Oppiaine:	Sähkötekniikka
Opintojen aloitusvuosi:	2013
Diplomityön valmistumisvuosi:	2019

Sivumäärä: 91

TIIVISTELMÄ

Alumiinin käyttö on keveytensä, hintansa ja hyvän sähkönjohtavuutensa ansiosta yleistynyt sähkövoimatekniikassa varsinkin suurjännitepuolella. Oikosulkumoottorin staattori käämitään perinteisesti kuparilangalla, mutta hinnaltaan edullisemmän alumiinin käyttö on tullut yhdeksi vaihtoehdoksi toteuttaa oikosulkumoottorin käämitys. Alumiinin sähkönjohtavuus on noin 60 % kuparin sähkönjohtavuudesta. Suoritusarvoiltaan samanlaisen kuparilangalla käämityn oikosulkumoottorin staattorin käämityksen poikkipinta-alaa on siis suurennettava, mikäli käämimateriaalina käytetään alumiinia.

Mekaanisesti alumiinilla käämintä ei juuri eroa kuparilla käämimisestä. Alumiini on hieman pehmeämpää kuin kupari, mutta suurimmat ongelmat ovat alumiinin pintaan muodostuva resistiiviinen oksidikerros ja galvaaninen korroosio. Työssä etsitään ja tutkitaan erilaisia alumiinijohtimille suunniteltuja kaapelikenkiä ja jatkoholkkeja. Tavoitteena on löytää komponentteja, jotka toimivat hyvin alumiinijohtimien kanssa sekä ovat turvallisia ja luotettavia käyttöä. Työssä tutkitaan myös jo valmiiksi tuotannossa kuparijohtimelle käytössä olevien kaapelikenkien ja jatkoholkkien soveltuvuutta alumiinijohtimelle. Edellä mainittujen komponenttien ja alumiinijohtimen liitoksia verrataan tuotannossa käytössä oleviin liitoksiin.

Lämpövanhennuskokeen avulla selvitetään liitoksien sähkönjohtavuuden muutosta liitoksien ikääntymisen vuoksi. Havaittiin, että lämpövanhennuskokeen perusteella alumiinijohtimille suunnitellut kaapelikengät ja jatkoholkit vaikuttavat toimivan hieman paremmin alumiinilangan kanssa kuin tuotannossa käytössä olevat kaapelikengät ja jatkoholkit. Vetolujuuskokeiden avulla pyrittiin selvittämään eri kaapelikenkien ja jatkoholkkien vetolujuuksia. Vetolujuuskokeiden perusteella alumiinin fysikaaliset ominaisuudet korostuivat enemmän kuin itse liitokset. Vetolujuuskokeissa yleisin syy liitoksen pettämiselle on langan katkeaminen. Alumiini kestää vetoa heikommin kuin kupari, sillä se on pehmeämpää.

AVAINSANAT: Oikosulkumoottori, alumiinikäämintä, alumiini, kupari

UNIVERSITY OF VAASA**Faculty of technology**

Author:	Mikko Ojala
Topic of the Thesis:	Electrical contacts of aluminum winding in induction motor
Supervisor:	Timo Vekara
Instructor:	Tero Käsäkangas
Evaluator:	Jere Kolehmainen
Degree:	Master of Science in Technology
Major of Subject:	Electrical Engineering
Year of Entering the University:	2013
Year of Completing the Thesis:	2019

Pages: 91

ABSTRACT

Aluminum as conductor material has become more common because of its lightness, price and good conductivity. Especially in high voltage applications aluminum is very common. Material of winding of induction motor is usually copper but aluminum has become a potential option for copper. Conductivity of aluminum is approximately 60 % of that of copper. Thus, cross sectional area of aluminum winding must be bigger if winding material of the same motor is replaced with aluminum.

Mechanically a stator of induction motor is as easy to wind with aluminum as with copper. Aluminum is softer than copper but the biggest problems in aluminum winding are oxidation of aluminum and galvanic corrosion. The aim of this thesis is to test and find different kind of cable lugs and joints which are designed for use with aluminum cables. The aim is to find cable lugs and joints which are safe and reliable to use in aluminum winding. Another aim is to find out if the cable lugs, which are used already in stator winding production, possible to use in aluminum winding. Connections between these components and aluminum cable are compared to connections used in the stator production.

A heat-aging test is used to study the conductivity change of connections in long time use. The heat-aging test showed that the conductivity stays better in aluminum connections when cable lugs and joints designed for aluminum connection are used than the cable lugs and joints used in the production. A tensile strength test is used to study tensile strength of the connections. The tensile strength test showed that physical properties of aluminum affect the tensile strength more than connection itself. The most common reason for connection breakdown is the snapping of the wire. Aluminum has lower tensile strength than copper because it's softer than copper.

KEYWORDS: Induction motor, aluminum winding, aluminum, copper

1 JOHDANTO

Oikosulkumoottorin käämitys on materiaaliltaan yleensä kuparia. Kuparilla on hintaansa nähden paras sähkönjohtavuus verrattuna muihin käytössä oleviin johdinmateriaaleihin (Copper alliance 2019a). Alumiinin käyttö oikosulkumoottorin käämityksen materiaalina on edullisuutensa puolesta tullut yhdeksi vaihtoehdoksi oikosulkumoottorin käämimateriaalina. Alumiini on sähkönjohtavuudeltaan hyvä, vaikkakin se on huonompi verrattuna kupariin. Edullisuutensa ja hyvän sähkönjohtavuutensa vuoksi alumiinia käytetään sähköteollisuudessa jo paljon esimerkiksi suurjännitelinjoissa (Teknologiateollisuus 2006: 27). Alumiinin käyttö käämimateriaalina ei ole kuitenkaan uutta. Esimerkiksi ABB:llä on ollut käytössä alumiinikääminällä olevia moottoreita. Alumiinista käämimateriaalina luovuttiin öljykriisin aikoihin 1970-luvulla. Syynä tähän oli, että moottoreista haluttiin tehdä parempia hyötysuhteiltaan. Tuohon aikaan ei ollut käytössä nykyaikaisia laskentaohjelmia, vaan kaikki moottorin suoritusarvot laskettiin käsin. Moottorin suoritusarvojen laskeminen käsin oli todella hidasta, joten alumiinikääminästä päätettiin luopua ja siirryttiin käyttämään kuparia käämimateriaalina. Tällä tavoin moottoreiden hyötysuhdetta saatiin nopeasti nostettua. (Känsäkangas 2018.)

Johdinmateriaalina kuparin korvaaminen alumiinilla ei ole täysin yksinkertaista, vaan muutamia seikkoja on otettava huomioon. Alumiini on pehmeämpää kuin kupari, minkä vuoksi siitä ei voida tehdä kovin ohutta lankaa (Braunovic, Konchits & Myshkin 2007: 75). Lisäksi alumiinin resistanssi on suurempi kuin kuparin, joten alumiinijohtimia käytettäessä on johtimen poikkipinta-alaa yleensä suurennettava, mikäli sähkönjohtavuus halutaan pitää samana. Alumiinin yhtenä ongelmana on sen pintaan muodostuva oksidikerros. Oksidikerros on hyvin resistiivinen, jolloin kerroksen muodostuminen sähköiseen liitoskohtaan aiheuttaa sen, että liitos ei ole sähkönjohtavuudeltaan enää yhtä hyvä kuin aikaisemmin (Braunovic ym. 2007: 214). Mainittakoon että, Yhdysvalloissa alumiinia on aikoinaan käytetty ja käytetään edelleen jonkin verran myös rakennusten sähköistyksissä. 1960- ja 1970-luvulla kuparin hinta oli korkealla ja asuinrakennusten sähköistyksiä toteutettiin paljon alumiinijohtimella. Alumiinin pinnalle muodostuneesta oksidikerroksesta johtuen johtavien liitosten pinta-alat pienenivät ja liitosresistanssit kasvoivat, jolloin liitosten ylikuumenemisen seurauksena useita rakennuksia paloi (Graser 2016 & Romano

2006). Kupari- ja alumiinijohtimia ei myöskään voida galvaanisen korroosion vuoksi liittää suoraan toisiinsa (Braunovic ym. 2007: 214–216).

Tämä diplomityö on tehty ABB oy:n Motors and Generators -yksikön Vaasan tuotekehitysosastolle. Työssä tarkoituksena on tutkia alumiinikäämityksellä toteutetun oikosulkumoottorin käämin sähköisiä liitoksia. Liitoksia ovat mm. käämienpäiden ja liitántäkaapeleiden liitoksiin käytettävien jatkoholkkien väliset liitokset sekä liitántäkaapeleiden ja niiden päihin liitettävien kaapelikenkien väliset liitokset. Tutkimuksessa vertaillaan ja etsitään tietoa erilaisista alumiinijohtimien liitostavoista sekä vertaillaan alumiinijohtimelle tarkoitettuja kaapelikenkiä ja niiden välisiä liitoksia jo käytössä oleviin, kuparijohtimille tarkoitettuihin kaapelikenkiin ja niiden välisiin liitoksiin. Työssä selvitetään myös, onko alumiinijohtimien kanssa mahdollista käyttää jo käytössä olevia, siis kuparijohtimille tarkoitettuja kaapelikenkiä. Tarkoituksena on löytää alumiinijohtimille käytettäviä turvallisia liitoksia, jotka säilyttävät hyvin sähkönjohtavuutensa korroosio-olosuhteissa ja rasituksessa. Liitoksen tulisi olla niin hyviä, että ne kestävät koko moottorin elinkaaren ajan.

Kaapelikenkien ja liitosholkkien mekaanista kestävyyttä ja mahdollisia eroja testataan vetokokeilla. Liitosten vanhenemista simuloidaan sääkaapin avulla. Lämpövanhenemiskokeista saaduilla tuloksilla voidaan tutkia liitosten liitosresistanssien muutoksia ja osittain myös arvioida liitosten korroosiokestävyyttä. Oleellinen tutkimuskohde lämpövanhenemiskokeissa on selvittää alumiinin pinnalle muodostuvan oksidikerroksen vaikutus liitosresistanssiin ja näin ollen liitoksen sähkönjohtavuuteen. Lämpövanhentamiskokeilla voidaan mahdollisesti myös arvioida galvaanisen korroosion vaikutusta, kun käytetään alumiinijohtimen kanssa kuparista valmistettuja, jo käytössä olevia kaapelikenkiä. Liitosten sähkönjohtavuutta ja liitosresistanssin muutosta tutkitaan mittaamalla resistanssi kaapelin päistä, joihin tutkittavat kaapelikengät tai jatkoholkit on liitetty. Resistanssi mitataan ennen ja jälkeen lämpövanhennuskokeen. Resistanssimittausten perusteella voidaan nähdä, paljonko tutkittavan liitoksen sähkönjohtavuus muuttuu.

Tämä diplomityö sisältää yhteensä kahdeksan lukua. Johdanto-osion jälkeen luvussa kaksi esitellään yleisesti oikosulkumoottorin rakenne sekä käydään tarkemmin läpi staat-

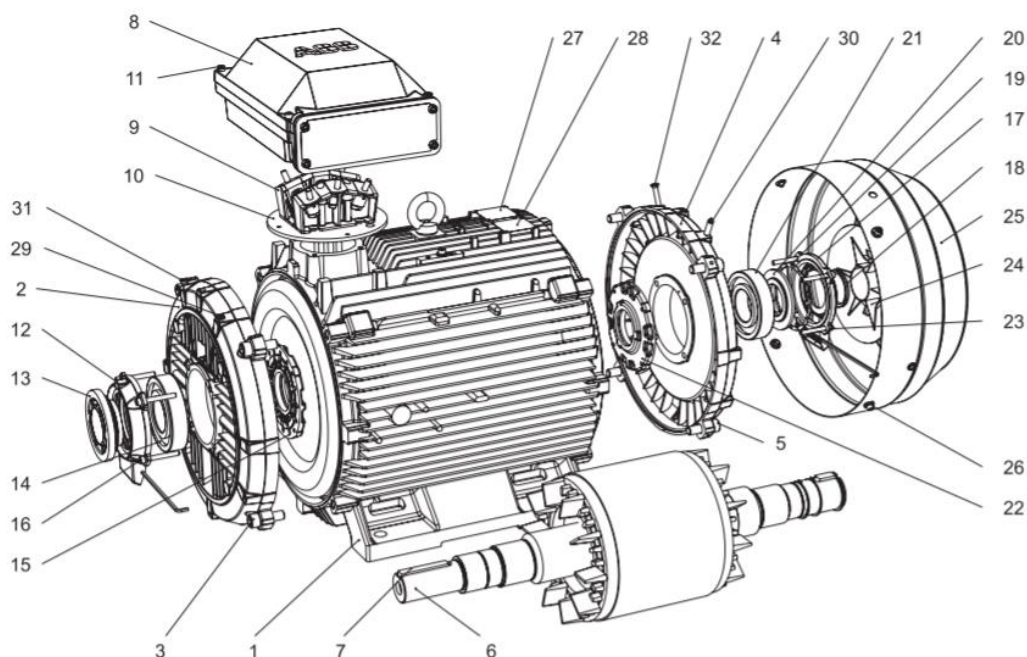
torikämmityksen rakenne. Kolmannessa luvussa esitellään alumiinin ja kuparin ominaisuuksia yleisellä tasolla ja vertaillaan niiden välisiä eroja johdinmateriaalina. Neljännessä luvussa esitellään sähköisten liitosten tyyppejä ja käydään läpi sähköisten liitosten perusteoria. Viidennessä luvussa esitellään liitoskohtiin heikentävästi vaikuttavia tekijöitä, kuten esimerkiksi erilaisia korroosiotyyppejä ja ympäristöolosuhteiden vaikutuksia. Kuudennessa luvussa esitellään erilaisia puristettavia kaapelikenkiä ja liitosholkkeja sekä käydään läpi niiden erilaisia puristusmenetelmiä. Tämän lisäksi luvussa käsitellään muita puristus- ja liitosmenetelmiä alumiini- ja kuparijohtimien liitoksiin. Seitsemännessä luvussa valitaan mm. tutkittavat kaapelikengät ja liitosholkit, esitellään testausmenetelmät ja -laitteisto. Kahdeksannessa luvussa raportoidaan testien tulokset ja tehdään johtopäätökset sekä kootaan lyhyt yhteenveto tuloksista.

2 OIKOSULKUMOOTTORIN RAKENNE JA HÄVIÖT

Oikosulkumoottorin kaksi keskeistä komponenttia ovat staattori ja roottori. Oikosulkumoottori on induktiokone, jossa sähköenergia muutetaan mekaaniseksi energiaksi staattorikäimityksen avulla. Staattorikäimitys indusoi jännitteen roottorin sauvoihin, jotka on oikosuljettu. Tällöin roottorikäimitykseen syntyy roottorivirta. Staattorin luoman pyörivän magneettikentän ja roottorin roottorivirran välille syntyy voimavaikutus, joka saa roottorin pyörimään (Hietalahti 2011: 60).

2.1 Staattorin ja roottorin rakenne

Staattorirauta valmistetaan latomalla päällekkäin tyypillisesti 0,2–1 mm paksuisia sähkölevyjä. Ladonnalla pyritään estämään haitallisia pyörrevirtoja. Hyviä sähkölevyn materiaaleja ovat mm. pii- ja alumiinirautaseokset. Staattoriraudan sisäpuolelle jätetään urat, joihin johdinlangasta käämityt vyyhdit asetetaan (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcová 2014). Myös staattorin sisään tuleva roottori valmistetaan latomalla sähkölevyistä. Roottoriraudan sisään jätetään urat, joihin sulasta alumiinista valetaan alumiinitangot. Tangot oikosuljetaan niiden päistä oikosulkurenkailla. Tällöin induktiolain mukaan roottorisauvoihin muodostuu virta, joka muodostaa magneettikentässä ollessaan magnetomotorisen voiman, jonka avulla roottori lähtee pyörimään staattorin muodostaman pyörivän magneettikentän mukana (ABB 2009). Kuten kuvasta 1 voidaan nähdä, oikosulkumoottori koostuu staattorin ja roottorin lisäksi staattorirungosta, akselista, laakereista, laakerikilvistä, liitäntäalustasta ja liitäntäkotelosta, tuulettimesta ja tuulettimen suojasta.



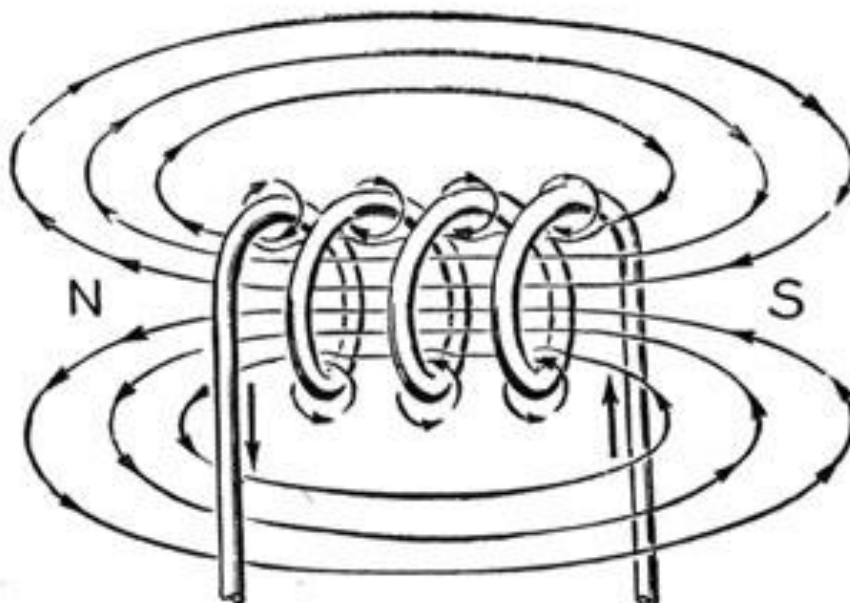
- | | | |
|--------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1. Staattorin runko | 13. Imurengas | 25. Tuuletinsuoja |
| 2. Laakerikilpi, D-pää | 14. Laakeri, D-pää | 26. Tuuletinsuojan ruuvit |
| 3. Laakerikilven ruuvit, D-pää | 15. Laakeripohja, D-pää | 27. Arvokilpi |
| 4. Laakerikilpi, N-pää | 16. Laakerikannen ruuvit | 28. Voiteluohjekilpi |
| 5. Laakerikilven ruuvit, N-pää | 17. Laakerikansi, N-pää | 29. Voitelunippa, D-pää |
| 6. Roottori ja akseli | 18. Tiiviste, N-pää | 30. Voitelunippa, N-pää |
| 7. Akselin kiila | 19. Aaltojousi | 31. SPM-nippa, D-pää |
| 8. Liitântäkotelo | 20. Imurengas, N-pää | 32. SPM-nippa, N-pää |
| 9. Liitântäalusta | 21. Laakeri, N-pää | |
| 10. Välilaippa | 22. Laakeripohja, N-pää | |
| 11. Liitântäkotelon ruuvit | 23. Laakerikannen ruuvit | |
| 12. Laakerikansi | 24. Tuuletin | |

Kuva 1. Räjätyskuva ABB:n 315 runkokoon oikosulkumoottorista (ABB 2018c: 97). Kuva on muokattu.

2.2 Staattorikäimityksen rakenne

Staattorikäimitys muodostuu johdinlangoista, joiden halkaisijat ovat yleensä alle 450-runkokoon moottoreissa 0,14–1,5 mm. Lankojen lukumäärä ja koko riippuu staattorin uramuodosta, koosta ja siitä, minkälaisia suoritusarvoja moottorista halutaan. Johdinlankojen lisäksi uraan tulee mahtua tarvittavat eristeet, joten staattoriuraa ei voida kokonaan täyttää johdinlangoilla. Täytekertoimenä käytetään yleensä 0,6–0,7 (Hyvönen 2016). Johdinlankana käytetään yleensä emaloitua kuparilankaa. Johdin, jossa kulkee virta, muodostaa ympärilleen magneettikentän. Johtimen kiertäminen vyyhdiksi muodostaa käämin.

Kuvasta 2 voidaan nähdä johdinlangasta kiedotun käämin muodostama magneettikenttä. (ABB 2018a & Hughes 2006: 6–9.)

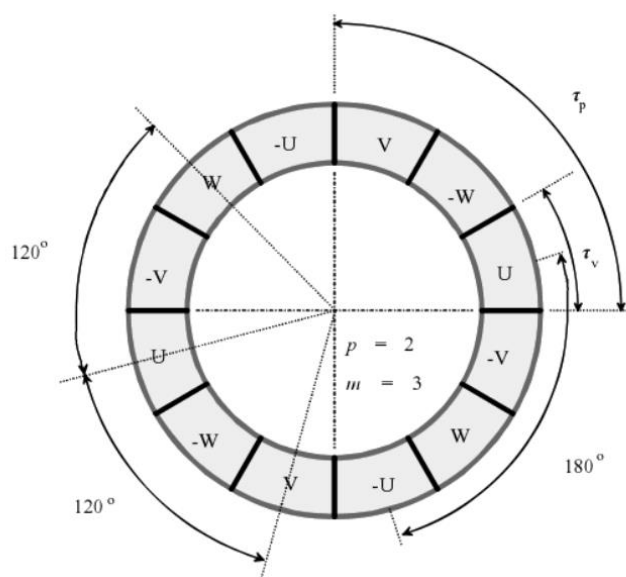


Kuva 2. Havainnollistava kuva käämin muodostamasta magneettikentästä (Maritime 2013).

Kuvassa 2 virran suunta on kuvattu nuolella. Yksittäinen käämi, jossa kulkee virta, muodostaa näin ollen magneetin. Virransuunta määrää kumpi pää käämistä muodostuu pohjoisnavaksi ja kumpi etelännavaksi. Oikosulkumoottoreista puhuttaessa yksittäisistä johtimista kelattua käämiä kutsutaan vyyhdiksi. Yksinkertaisissa käämityksissä vyyhti asetetaan kahteen, vyyhdinleveyden päässä toisistaan olevaan uraan. Mikäli staattorin uria on samalle vaiheelle vierekkäin useampia, uriin asetettavat vyyhdit muodostavat vyyhtiryhmän. Ennen vyyhtien asettamista staattorin uriin asetetaan uraeristeet, jotka eristävät vyyhdit staattoriraudasta. Vyyhtien asettamisen jälkeen urat suljetaan urakiilalla. Tällöin vyyhdit eivät pääse purkautumaan urasta ulos. Uraeriste ja urakiila myös auttavat tukemaan vyyhdit jäämäkästi staattoriuriin. (Verkkonen 2007: 21.)

2.3 Käämien asettelu staattoriin

Kuten edellisessä aluvuussa mainittiin, virta indusoidaan roottorin häkkikäämityksen alumiinisauvoihin staattorikäämityksen avulla. Roottorivirran ja staattorin luoman pyörivän magneettikentän välille syntyy voimavaikutus, jolloin roottori alkaa pyörimään. Oikosulkumoottorit tehdään yleensä kolmivaiheisiksi, koska yleensä käytettävä sähköverkko on myös kolmivaiheinen. Pyörivä magneettikenttä saadaan aikaan, kun oikosulkumoottorin kolme vaihetta jaetaan tasaisesti staattoriin. Tällöin kyseessä on symmetrisen monivaihekäämitys. (Hyvönen 2016: 15.) Symmetrisessä monivaihekäämityksessä staattorin napajako tehdään siten, että yhden käämin leveys on vuoaallon puolijakson suuruisen eli 180 sähköastetta (Verkkonen 2007: 16 & Pyrhönen ym. 2014: 54–57). Kuvassa 3 on esimerkki nelinapaisen oikosulkumoottorin staattorista jaettuna vaihealueisiin.



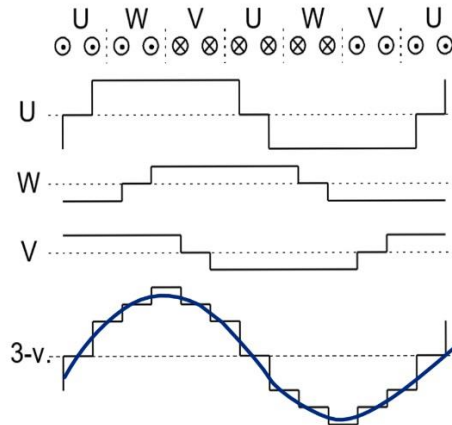
Kuva 3. Kolmivaiheisen nelinapaisen oikosulkumoottorin staattori jaettuna vaihealueisiin. Kuvassa p on napapariluku, m on vaiheluku, τ_p on napajako ja τ_v on vyöhykejako (Pyrhönen ym. 2014: 56).

Kuvassa 3 vaiheet on merkitty kirjaimilla U, V, ja W. Tämä on myös yleinen merkintätapa, joilla vaiheet merkitään liitäntäkaapeleihin (ABB 2018b). Positiivisella ja negatiivisella merkillä on kuvassa kuvattu virran suunta käämissä. Huomioitavaa on, että sähkö-

aste ei ole yhtä kuin geometrinen aste. Napaluvun kasvaessa vaiheiden välinen sähkökulma pysyy samana, mutta geometrinen kulma pienenee. Kuvan 3 nelinapaisen moottorin saman vaiheen vierekkäiset käämit ovat geometrisesti toisiinsa nähden 90° :n kulmassa. Kuusinapaisella moottorilla vastaava luku olisi 60° . Kun tiedetään staattorin urien lukumäärä ja moottorin napa- ja vaiheluku, voidaan määrittää vakoluku eli tarvittavien urien lukumäärä vaihetta ja napaa kohden. Vakoluku voidaan laskea yhtälöllä

$$q = \frac{Q}{2pm}, \quad (1)$$

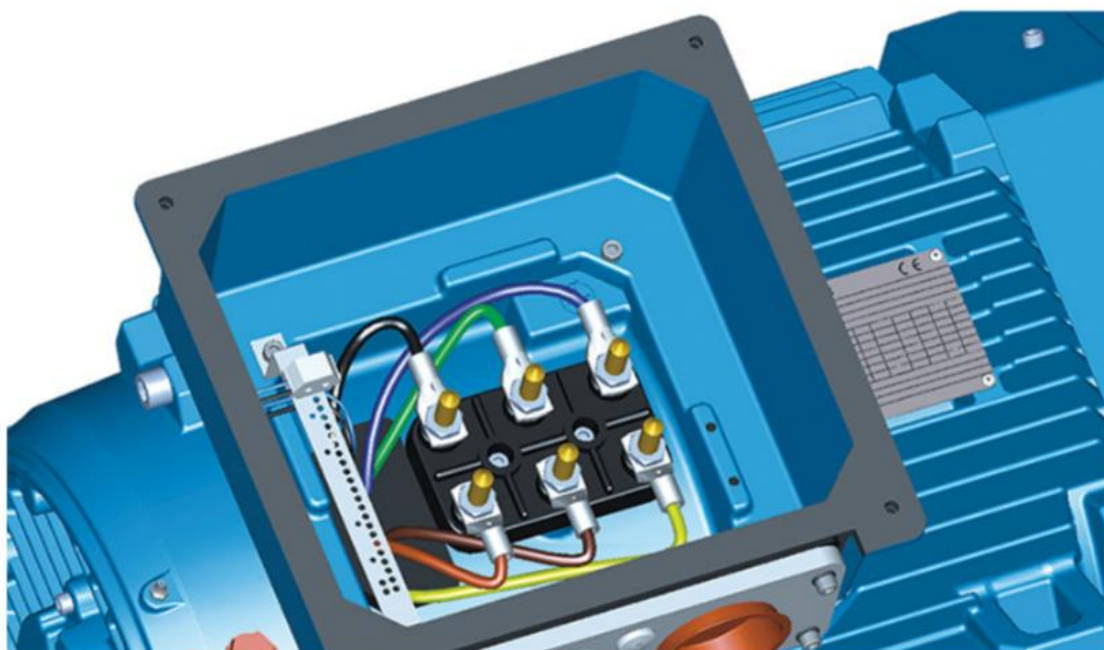
missä Q on staattorin uraluku, p on napapariluku ja m on vaiheluku. Roottorin ja staattorin väliin jäävässä ilmavälissä käämin aiheuttaman vuon voidaan olettaa jakautuvan tasaisesti. Kun staattorin käämeihin syötetään kolmivaihevirtaa, kolmivaiheinen magnetomotorinen voima syntyy kuvan 4 mukaisesti. Kyseinen kolmivaiheinen magnetomotorinen voima saa roottorin pyörimään. (Verkkonen 2007: 16-26 & Pyrhönen ym. 2014: 56.)



Kuva 4. Eri vaiheiden muodostamat magnetomotoriset voimat ja alla yhteen summattu magnetomotorinen voima (Verkkonen 2007: 26). Kuva on muokattu.

2.4 Käämien kytkentä

Käämintävaiheessa yksittäiset vyyhdit liitetään toisiinsa ja valmiista staattorista tuodaan ulos kunkin vaiheen alku- ja loppupää. Vaiheiden päät viedään staattorirungon läpi liitännäkoteloon. Kuvassa 5 on kuvattu moottorin liitännäkotelossa oleva liitinalusta, johon on kytketty staattorin käämiltä tulevat vaiheet.



Kuva 5. ABB Oy:n 160–250 runkokokojen oikosulkumoottorin liitännäkotelon ja liitinalusta (ABB 2018c: 73).

Liitinalusta valmistetaan eristävästä materiaalista, jonka tarkoituksena on eristää liitännäkaapeleiden päät moottorirungosta. Kuten kuvasta 5 nähdään, liitinalustaan on upotettu pultit, joihin liitännäkaapelit kiinnitetään puristettavien kaapelikenkien avulla. Pulttien ja kaapelikenkien koko vaihtelee moottorin ja liitännäkaapeleiden koon mukaan. Esimerkiksi ABB:llä 71–250 runkokokojen moottoreissa on käytössä M4-, M5-, M6- ja M10-koon ruuveja. Moottorin mukana toimitetaan kytkentäliuskat, joiden avulla moottori voidaan kytkeä tähti- tai kolmiokytkentään. Vaihtoehtoisesti voidaan puhua D- ja Y-kytkennästä. Syöttökaapelit tuodaan liitinalustaan liitännäkotelon sivussa olevasta aukosta, joka on havaittavissa myös kuvasta 5. (ABB 2018a & ABB2018c.)

2.5 Oikosulkumoottorin häviöt

Oikosulkumoottorin hyötysuhde muodostuu verkosta otetun tehon ja akselitehon suhteesta. Hyötysuhde η voidaan laskea yhtälöllä

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{in}} - P_{\text{loss}}}{P_{\text{in}}}, \quad (2)$$

missä, P_{out} on akseliteho, P_{in} on verkosta otettu teho ja P_{loss} kuvaa häviöitä. Kuten yhtälöstä 2 nähdään, akseliteho määräytyy verkosta otetusta tehosta ja moottorissa tapahtuvista häviöistä (Verkkonen 2007: 54). Sähkömoottorin häviökomponentteja ovat staattorin ja roottorin virtalämpöhäviöt, rautahäviöt, lisähäviöt ja mekaaniset häviöt (Pyrhönen ym. 2014). Staattorin virtalämpöhäviöt voidaan ilmoittaa yksinkertaistettuna tasavirtatehon yhtälöllä

$$P_{Cu,s} = 3R_1 I_1^2, \quad (3)$$

missä R_1 on johtimen tasavirtaresistanssi ja I_1 on johtimessa kulkeva virta. Sinimuotoisella vaihtojännitteellä syötettävän oikosulkumoottorin virran voidaan myös olettaa olevan sinimuotoista. Tällöin virranahdon vaikutus voidaan olettaa olevan vähäistä ja vaihtovirtaresistanssi voidaan laskea tasavirtaresistanssin yhtälöllä. (Aura & Tonteri 2002: 328; Malinen 2005: 14.)

$$R_1 = \frac{l}{\sigma a S}, \quad (4)$$

missä l on johtimen pituus, σ on johtavuus, a on rinnakkaisten johtimien lukumäärä ja S on johtimen poikkipinta-ala. Nyt voidaan esimerkiksi laskea kuparin ja alumiinin resistanssien ero ja vaikutus staattorin virtalämpöhäviöihin. Puhtaan kuparin johtavuus σ_{Cu} +20 °C lämpötilassa on $58 \cdot 10^6$ S/m ja vastaavasti alumiinin johtavuus σ_{Al} on $37 \cdot 10^6$ S/m (Pyrhönen ym. 2014: 265). Tällöin, jos oletetaan johtimien pituuksien, lukumäärän

ja poikkipinta-alojen pysyvän samana saadaan resistanssien suhteeksi

$$\frac{R_{\text{Cu}}}{R_{\text{Al}}} = \frac{\frac{1}{58 \cdot 10^6} \text{ S/m}}{\frac{1}{37 \cdot 10^6} \text{ S/m}} \approx 0,64 \text{ eli kuparin resistanssi on noin } 64 \% \text{ alumiinin resistanssista.}$$

Tällöin staattorin virtalämpöhäviöt ovat 56 % suuremmat saman kokoisella alumiinijohtimella. Mikäli kuparijohtin halutaan korvata alumiinijohtimella ja halutaan, että resistanssi pysyy samana, on alumiinijohtimen poikkipinta-alaa kasvatettava noin 60 %. Tällä tavoin oikosulkumoottorin staattorin virtalämpöhäviöitä voidaan yrittää pienentää kasvattamalla kääminnän poikkipinta-alaa. Tässä rajoittavaksi tekijäksi muodostuu nopeasti staattoriuran koko ja muoto (Vesti 2013: 19–20). Alumiinin lämmönjohtavuus on samaa luokkaa kuin sähkönjohtavuus eli noin 60 % kuparin lämmönjohtavuudesta (Peda.net 2019).

Rautahäviöillä tarkoitetaan staattori- ja roottoriraudassa esiintyviä häviöitä. Rautahäviöt johtuvat hystereesihäviöistä ja pyörrevirroista. Näistä hystereesihäviöiden osuus rautahäviöistä on huomattavasti suurempi kuin pyörrevirtahäviöt. Hystereesihäviöt syntyvät, kun terästä magnetoidaan vaihtovirralla. Magneettidipolit vaihtavat suuntaa magneettikentän muutoksen mukaan, minkä seurauksena alkeismagneettien välille syntyy kitkaa, joka aiheuttaa lämpöä. Pyörrevirtahäviöitä taas syntyy, kun muuttuva magneettikenttä indusoi oikosulkumoottorin sähkölevyihin jännitteitä. Kiinteissä kappaleissa pyörrevirrat pystyvät vastustamaan hyvin muuttuvaa magneettikenttää ja pääsevät näin ollen liikkueensa tuottamaan häviöitä. Tästä syystä pyörrevirtojen estämiseksi staattori ja roottori ovat ladottu ohuista sähkölevyistä. Ladonnan lisäksi myös sähkölevyn materiaalin valinnalla voidaan vaikuttaa rautahäviöihin. (Pyrhönen ym. 2014: 526; Vesti 2013: 14–16.)

Mekaanisilla häviöillä tarkoitetaan moottorin mekaanisissa osissa tapahtuvia häviöitä. Näitä ovat mm. laakereiden hankaushäviöt, roottorin tuuletussiivekkeistä johtuvat häviöt sekä tuuletinhäviöt. Laakereiden hankaushäviöihin vaikuttavat käytettävien laakereiden tyyppi, materiaali ja akselin pyörimisnopeus. Lisäksi laakereiden voiteluun käytettävän laakerirasvan tyypillä on vaikutusta hankaushäviöihin. Yleensä laakerivalmistajat ilmoittavat laakereidensa hankaushäviöt. Hankaushäviöt ovat suoraan verrannollisia moottorin pyörimisnopeuteen. Roottorin oikosulkurenkaisissa on tyypillisesti pienet siivekkeet, jotka

jäähdyttävät roottoria. Siivekkeiden koko ja muoto vaikuttavat moottorin kokonaishäviöihin. Myös roottorin pyörimisnopeus vaikuttaa roottorin tuuletushäviöihin. Moottorin jäähdyttämistä varten akselin päähän asennettu tuuletin aiheuttaa pyöriessään tuuletushäviöitä. Häviöihin vaikuttavat tuulettimen koko ja pyörimisnopeus. Tuulettimen materiaali vaikuttaa tuulettimen massaan, joka vaikuttaa myös tuuletushäviöihin. Tuuletushäviöt ovat neliöllisesti verrannollisia moottorin pyörimisnopeuteen. Oikosulkumoottorin hyötysuhdetta voidaan näin ollen nostaa esimerkiksi pienentämällä tuuletinta. Tällöin jäähdytysteho kuitenkin pienenee, jolloin moottorin lämpenemä on otettava huomioon. (Pyrhönen ym. 2014: 524–528; ABB 2018a; Vesti 2013: 18.)

Mekaanisten häviöiden lisäksi moottorin häviöitä ovat lisähäviöt. Lisähäviöt ovat periaatteessa kaikkien loppujen häviöiden summa, mikä jää jäljelle staattorin ja roottorin lämpöhäviöiden, rautahäviöiden ja mekaanisten häviöiden jälkeen. Lisähäviöt koostuvat mm. magneettivuon vaihtelusta, hajavuosta ja magneettivuon epätasaisesta jakautumisesta il-mavälissä. Osa lisähäviökomponenteista ovat hyvin vaikeasti laskettavissa. Lisähäviöiden tarkempi määrittäminen on annettu IEC 60034-2-1 (Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)) standardissa. (Pyrhönen ym. 2014: 526.)

3 KUPARI JA ALUMIINI JOHDINMATERIAALEINA

Kupari ja alumiini ovat sähkövoimatekniikassa tällä hetkellä kaksi eniten käytettyintä johdinmateriaalia. Keveyden ja edullisuuden vuoksi varsinkin suurjännitelinjoissa alumiinin käyttö johdinmateriaalina on kasvanut voimakkaasti. Kuparin käyttö on edelleen yleisempää, kun käytetään pieniä jännitteitä ja suuria virtoja. (Siemens 2014.) Näin ollen voidaan ajatella, että tällaisia sovelluksia ovat myös pienellä jännitteellä toimivat oikosulkumoottorit. Esimerkiksi ABB:n oikosulkumoottoreiden käämimateriaali on pääasiassa kuparia (ABB 2018c).

3.1 Kuparin ja alumiinin ominaisuudet

Kupari on pehmeä ja hyvin muokattavissa oleva metalli. Kuparilla on hyvä sähkönjohtavuus sekä loistavat hitsaus- ja juotettavuusominaisuudet. Kuparista voidaan valmistaa sähköteollisuuden tarpeisiin monenlaisia kappaleita. Kuparista voidaan valmistaa esimerkiksi johtoja, tankoja, virtakiskoja ja levyjä. Yleisimmin sähkövoimateollisuudessa käytetty kupari on ETP-kupari (Electrolytic Tough Pitch Copper), joka tunnetaan myös nimellä C111000. Normaaliolosuhteissa kuparin korroosionkesto-ominaisuudet ovat erittäin hyvät. Huoneenlämmössä kuparin pintaan muodostuu kuparioksidikerros, joka suojaaa kuparia hapettumiselta ja muilta korroosiota aiheuttavilta tekijöiltä. Kuparioksidikerros on osittain johtavaa. Kuparille haitallisia aineita ovat ilman välityksellä kulkeutuvat ammoniakki- ja klooriyhdisteet. Meren läheisyydessä suolainen ilmasto voi myös aiheuttaa korroosiota kuparin pintaan. (Braunovic ym. 2007: 71–73.)

Alumiinilla on kuparin tavoin hyvä sähkönjohtavuus. Alumiinia käytetään hyvin monipuolisesti useilla eri aloilla, esimerkiksi elintarvike-, auto-, lento-, ja sähköteollisuudessa (Younis 2011: 13). Alumiinia on saatavilla erilaisina seoksina, jotka on luokiteltu 1xxx-, 2xxx-, ..., 7xxx ja 8xxx-sarjan seoksiksi. Seosaineet ja -suhteet vaihtelevat eri sarjojen välillä. Esimerkiksi 1xxx-sarjan alumiinit ovat hyvin puhtaita (yli 99 % alumiinia), kun taas esimerkiksi 2xxx-sarjan alumiinit ovat seostetut kuparilla. (Aluminum association 2019.)

Kuparin tavoin alumiinin pintaan muodostuu normaaliolosuhteissa 0,01–0,1 µm paksu oksidikerros, joka suojaa alumiinia erittäin hyvin korroosiota vastaan. Oksidikerros myös uusiutuu välittömästi, mikäli se vaurioituu ulkoisesti. Oksidikerroksen paksuutta ja muodostumisnopeutta lisäävät mm. korkea lämpötila ja kosteus (Teknoliateollisuus 2006: 100–101). Toisin kuin kuparin oksidikerros, alumiinin oksidikerros on hyvin resistiivinen, sillä sen resistiivisyys on 10^{24} µΩ. Oksidikerros on myös läpinäkyvä, joten puhtaan ja kiiltävän näköinen pinta ei ole tae siitä, etteikö pintaan olisi muodostunut suojaava oksidikerros. (Braunovic ym. 2007: 211). Alumiinin resistiivinen oksidikerros tuo sähköisiin liitoskohtiin nähtävästi haasteita. Vaikeasti havaittava, resistiivinen ja nopeasti muodostuva, suojaava kalvo, on haasteellinen, koska liitoksen tulisi olla erittäin hyvin sähköä johtava.

3.2 Kuparin ja alumiinin keskeiset eroavaisuudet

Kuparilla ja alumiinilla on eroja mm. hinnassa sähkönjohtavuudessa, mekaanisessa kestävydessä ja tiheydessä. Taulukkoon 1 on koottu kuparin ja alumiinin keskeisiä eroavaisuuksia.

Taulukko 1. Kuparin ja alumiinin ominaisuuksia. (Markets Insider 2019; Siemens 2014). Taulukkoa muokattu.

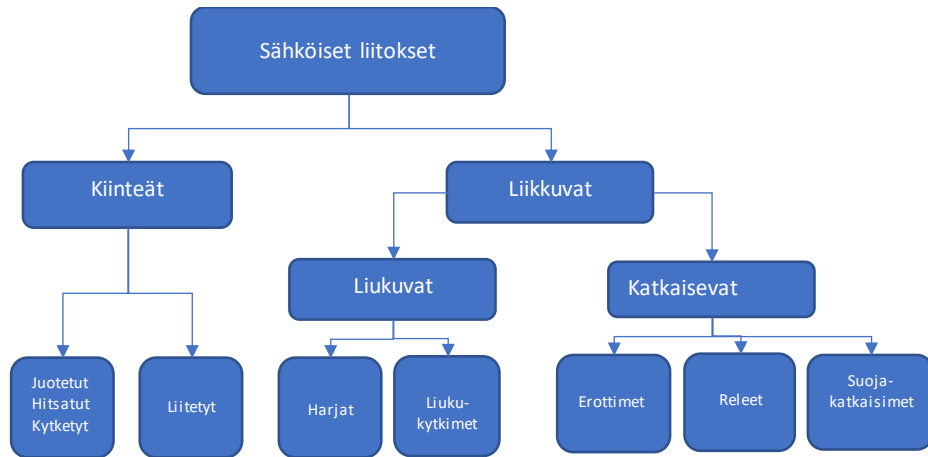
	Alumiini	Kupari
Hinta (USD/t)	1824	5888
Tiheys (g · cm ³)	2,7	8,94
Sähkönjohtavuus (S/m · 10 ⁶)	37	58
Resistanssi (nΩ·m)	28,2	16,78
Luontainen korroosiokestävyys	Erittäin hyvä	Hyvä
Vetolujuus (Mpa)	200	380

Alumiinin tiheys on 2,7 g/cm³, joten se on kuparia kevyempää. Kuparin tiheys on 8,9 g/cm³. Jos kuparijohdin korvataan resistanssiltaan ja pituudeltaan vastaavalla alumiinijohdella, niin alumiinikaapelin poikkipinta-alaa on tällöin kasvatettava noin 60 %.

(Braunovic ym. 2007: 75.) Kuparin hinta on pörssikurssista riippuen noin kolminkertainen alumiinin hintaan. Vuoden 2019 alkupuolella alumiinin pörssihinta oli noin 1800 USD/t. Vastaavasti kuparin pörssihinta oli noin 5900 USD/t (Markets Insider 2019). Monissa sähkötekniikan sovelluksissa alumiini on tullut kannattavaksi kuparin korvaajaksi. (Siemens 2014.)

4 SÄHKÖISET LIITOKSET

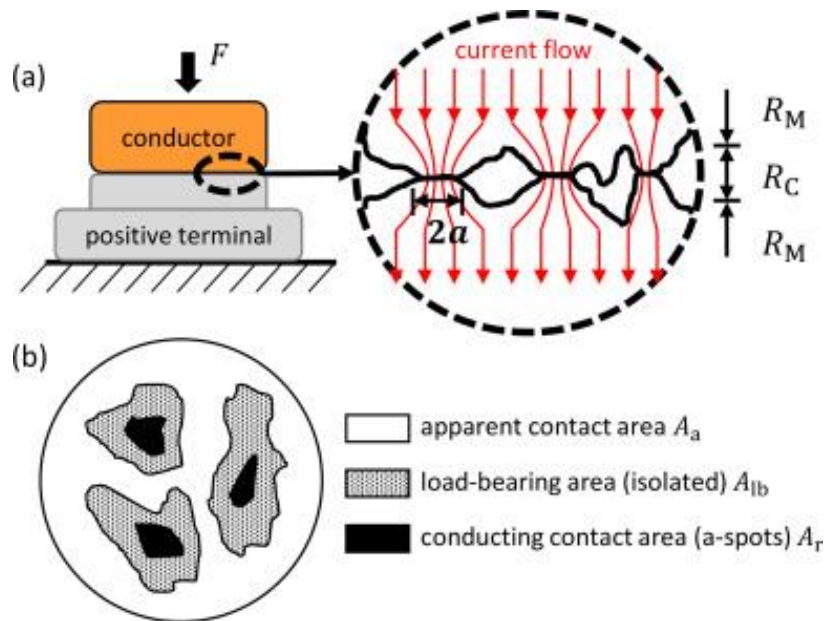
Sähköisiä liitoksia on useita erilaisia. Liitokset voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään: liikkuvat ja kiinteät liitokset. Kuvassa 6 on esitettyä erilaisten sähköisten liitosten jaot- telun lohkokkaavio.



Kuva 6. Kaavio sähköisistä liitoksista (Braunovic 2007: 4). Kuva on muokattu ja teksti on suomennettu.

Kuvasta 6 nähdään että, liikkuvat liitokset voidaan jakaa liukuviin ja katkaiseviin (eng. commutating) liitoksiin. Liukuvia liitoksia ovat mm. erilaiset harjat, kuten esimerkiksi tasavirtamoottoreissa käytettävät hiiliharjat. Muita liukuvia liitoksia ovat esimerkiksi erilaiset liukukytkimet, kuten esimerkiksi potentiometrit. Katkaiseviin liitoksiin voidaan lukea esimerkiksi releet ja suojakatkaisimet. Kiinteitä liitoksia ovat mm. juotetut ja hitsatut liitokset. Esimerkiksi virtakiskoihin kaapelikengällä liitetyt kaapelit muodostavat kiinteän liitoksen. (Braunovic ym. 2007: 4). Tässä työssä tutkittavat, oikosulkumoottorin käynnin liitokset ovat kaikki kiinteitä liitoksia. Esimerkiksi kaapelikengä tai jatkoholkki on tarkoitus liittää johtimeen tai liitäntäkaapeliin pysyvästi, jolloin kyseessä on kiinteä liitos.

Liitettävien metallien pinnat eivät koskaan ole täysin tasaisia. Pintojen epätasaisuuden lisäksi pinnoilla on yleensä myös oksidikerros sekä mahdollisesti muista epäpuhtauksista muodostuva eristävä kerros. Näin ollen sähköisessä liitoksessa virta ei kulje koko liitospinnan läpi vaan kahden yhteen painetun metallin välille syntyy pieniä johtavia alueita, jonka kautta virta kulkee liitoksessa. (Braunovic ym. 2007: 6.) Kuvasta 7 on nähtävissä havainnekuva liitospinnasta.



Kuva 7. Kahden metallin välinen sähköinen liitos (a) ja vastaavasti projektio (b). Punaisella on kuvattu virran kulkureitti. R_m on johteen resistanssi ja R_c varsinaisen liitospinnan resistanssi. (Bolsinger, Zorn & Birke 2017; Braunovic ym. 2007: 6.)

Kuvasta 7 voidaan havaita, että metallien epätasaisuuksista johtuen virta ei pääse suoraan siirtymään metallista toiseen vaan sen täytyy kulkea toisiaan vastaan olevien huippujen kautta. Tämä aiheuttaa liitokseen resistanssia (eng. constriction resistance). Kyseinen resistanssi R_s voidaan esittää yhtälöllä

$$R_s = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4a}, \quad (5)$$

missä ρ_1 ja ρ_2 ovat metallien resistiivisyydet ja a on johtavan pinnan säde. Tämän lisäksi metallien pinnoilla vaikuttaa oksidikerros sekä epäpuhtaudet, jotka aiheuttavat myös resistanssia liitoskohtaan (eng. film resistance). Kyseinen resistanssi R_f voidaan esittää yhtälöllä

$$R_f = \frac{\sigma}{\pi a^2}, \quad (6)$$

missä σ on kalvon resistanssi pinta-alaa kohti. Näin ollen liitoksen kokonaisliitosresistanssi R_c voidaan ilmoittaa epätasaisuuksista ja epäpuhtauksista johtuvan resistanssien summana

$$R_c = R_s + R_f. \quad (7)$$

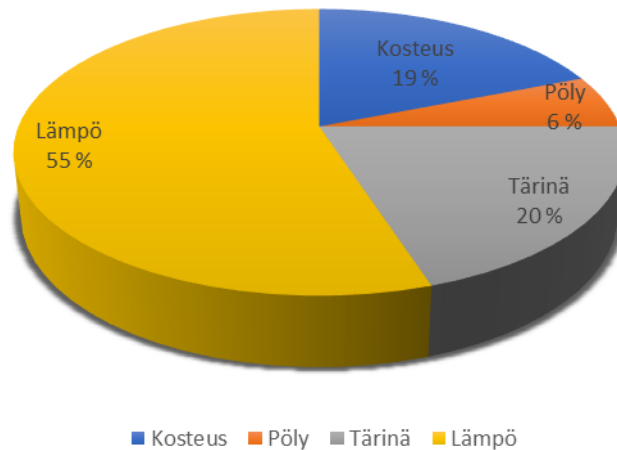
Liitosresistanssi on yksi tärkeimmistä huomioon otettavista seikoista kaikissa sähköisissä liitoksissa. (Braunovic ym. 2007: 6–7.)

5 SÄHKÖISIIN LIITOKSIIN HEIKENTÄVÄSTI VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Erilaisten metallien liitokset joutuvat usein teollisuuskäytössä hyvinkin vaikeisiin ympäristöolosuhteisiin. ABB oy:n Vaasan moottoritehtaalla valmistettavat moottorit voivat päätyä esimerkiksi laivan kannelle tai räjähdysvaarallisiin tiloihin. Oikosulkumoottori voi joutua ankarien ympäristövaikutusten lisäksi alttiiksi myös erilaisille teollisuudessa käytettäville kemikaaleille ja muille korroosiota aiheuttaville aineille. Vaikka valmistettavien moottoreiden liitântäkotelot ovat hyvin suojattuja, niin siitä huolimatta moottorin sisäisissä sähköisissä liitoksissa on otettava huomioon mahdolliset korroosiota aiheuttavat ympäristötekijät.

Kuvasta 8 voidaan nähdä elektroniikkalaitteen yleisimmät vikaantumiseen johtavat syyt. Kaikki kuvassa 8 esitetyt ympäristövaikutukset ovat korroosiota lisääviä ja kiihdyttäviä ominaisuuksia. Korkea tai laajasti heilahteleva lämpötila yhdistettynä korkeaan vallitsevaan kosteuteen kiihdyttää korroosiota ja tätä kautta vaikuttaa laitteen vikaantumiseen (VTT 2007: 20). Elektroniikkalaitteet ovat oleellisesti herkempiä vikaantumaan verrattuna oikosulkumoottorin liitântäosiin, mutta tietoa voidaan käyttää hyväksi tutkittaessa ja arvioitaessa erilaisten korroosiotekijöiden vaikutuksia. Sähkömoottorin liitântäosia ajatellen vikaantumiseen johtavat ympäristötekijät ovat todennäköisesti suhteellisesti hyvin samanaiset.

Korroosiota on kolmea päätyyppiä: kemiallista, sähkökemiallista ja korkean lämpötilan korroosiota. Tässä työssä mahdollisesti esiintyvä korroosiotyyppi on sähkökemiallinen korroosio, joita ovat mm. galvaaninen korroosio, eroosio, rako- ja pistekorroosio, valikoiva liukeneminen, raerajakorroosio ja jännityskorroosio. Lisäksi sähkökemiallista korroosiota on yleinen syöpyminen. (TUT 2005.)



Kuva 8. Elektroniikkalaitteen vikaantumisen syyt ilmailualalla (VTT 2007, kuvaa on muokattu).

5.1 Ympäristövaikutukset sähköisiin liitoksiin

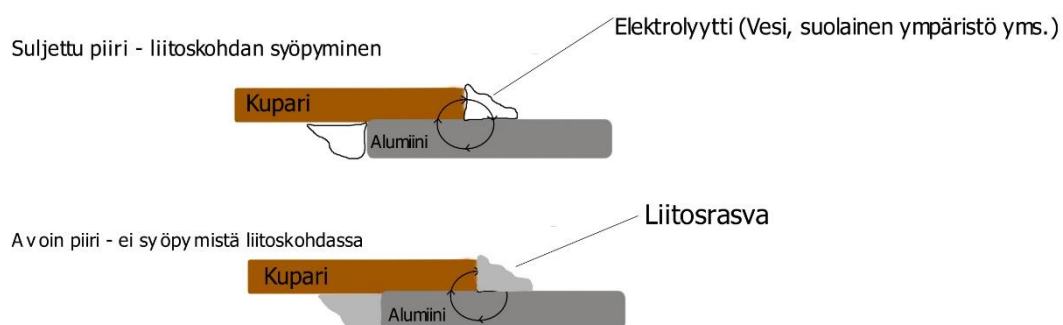
Korroosion syntymiseen vaikuttavia tekijöitä ovat nopeat lämpötilanvaihtelut sekä ilman kosteus ja epäpuhtaudet. Eniten metallien korroosioon vaikuttaa pinnan märkänäöoloaika. Kosteuden ei tarvitse olla edes silmin havaittavaa, sillä vain kolmen vesimolekyylin paksuinen kalvo riittää saamaan aikaan saman korroosiovaikutuksen kuin kosteus suuremmissa mittakaavassa. (Aromaa 2005: 24.) Lämpötilan nopeat vaihtelut lisäävät kosteuden absorboitumista pinnoille. Kosteus nostaa korroosioriskiä huomattavasti. Ilmasta pinnoille absorboituvat epäpuhtaudet on myös suuri korroosiota kiihdyttävä riski. Esimerkiksi useimmat ilmasta pinnoille kertyvät suolat ovat todella hyviä elektrolyyttejä eli ne johtavat hyvin sähköä. Pinnoille kertyvät partikkelit ovat myös erittäin herkkiä keräämään vettä, jolloin ne muodostavat koko pinnalle hyvin johtavan ja tunkeutuvan liuoksen. Tämä liuos altistaa pinnat erittäin hyvin korroosiolle. (VTT 2007.) Metallien korroosiolle altistumisen kannalta tärkein ilman epäpuhtaus on erilaiset rikkiyhdisteet (Aromaa 2005:24).

Lämpötilalla on vaikutusta lähinnä korroosionopeuteen. Lämpötilan noustessa myös korroosionopeus kasvaa ja tavallisesti 10 °C lämpötilan nousu riittää kaksinkertaistamaan reaktionopeuden. Lämpötilan laskiessa taas reaktionopeus hidastuu ja alle -20 °C lämpötilassa korroosioreaktio pysähtyy. (Aromaa 2005: 25.)

5.2 Galvaaninen korroosio sähköisissä liitoksissa

Galvaanista tai bimetallista korroosiota tapahtuu, kun kaksi tai useampi eri metalli on liitetty toisiinsa tai ne ovat liitettynä toisiinsa saman elektrolyytin kautta. Galvaaninen korroosio johtuu kahden eri metallin potentiaalierosta, joka puolestaan johtuu metallien jalousasteesta. Tämä tarkoittaa sitä, että epäjalompi metalli muodostuu anodiksi eli sillä on matalampi potentiaali. Jalompi metalli puolestaan muodostaa katodin ja sillä on tällöin suurempi potentiaali. Periaatteessa molemmat metallit syöpyvät, mutta potentiaalierosta johtuen sähkökemiallisten reaktioiden nopeudet muuttuvat, jolloin katodin syöpyminen hidastuu ja anodin syöpyminen nopeutuu. Katodin syöpyminen voi myös loppua kokonaan. Sähkökemiallista reaktiota nopeuttaa anodin ja katodin suhteellinen koko toisiinsa. Katodiin suhteessa pienempi anodi aiheuttaa anodille suuremman virrantiheyden, jolloin anodin syöpyminen nopeutuu entisestään. Vastaavasti galvaanista korroosiota voidaan hidastaa, jos anodi on huomattavasti katodia suurempi. (Aromaa 2005: 66–67.)

Galvaanisen korroosion syntyyn vaaditaan, että seuraavat kolme seikkaa täyttyvät: (1) materiaaleilla on potentiaaliero, (2) materiaaleilla on yhteinen elektrolyytti ja (3) materiaalien välillä on sähköisesti sulkeutunut piiri (Braunovic ym. 2007). Kuvasta 9 voidaan nähdä periaatekuva alumiinin ja kuparin välisestä liitoksesta. Galvaaniseen korroosioon sähkökemialliseen reaktioon tarvitaan elektrolyytti. Elektrolyytinä voi toimia esimerkiksi vesi tai suolainen merivesi.



Kuva 9. Galvaaniseen korroosioon vaikuttavat tekijät ja niiden estäminen. (Braunovic ym. 2007: 215)

Eri metallien välisiä potentiaalieroja ja liitoksellista yhteensopivuutta voidaan tarkastella esimerkiksi normaalipotentialitaulukon avulla. Normaalipotentialitaulukossa vertailukohtana on vetyelektrodin potentiaali. Jalommilla metalleilla on suurempi potentiaali vetyelektrodiin nähden ja vastaavasti taas pienempi potentiaali tarkoittaa epäjalompaa metallia. Mitä suurempi potentiaaliero eri metalleilla on taulukossa, sitä voimakkaampi on galvaaninen korroosio (Fontana 1987: 42). Internetistä on löydettävissä myös erilaisia metallien yhteensopivuustaulukoita. Esimerkkinä kuvassa 10 oleva metallien galvaaninen yhteensopivuustaulukko.

Below the red line, the metal listed in the vertical column will be attacked:
 - the metal combined is not subject to galvanic corrosion - on the contrary, it benefits from a protective effect
 - the galvanic effect is influenced by the interaction between the surfaces of the two metals in contact - if the
 - surface of the metal considered is the smallest, its corrosion increases, and vice versa

Protected paired cathodic metal (more noble) -	Platinum	0																																															
		130	0																																														
Corroded metal considered to be anodic (less noble) +	Gold	250	120	0																																													
	Stainless steel 18-9	350	220	100	0																																												
	Silver	350	220	100	0																																												
	Mercury	430	300	180	80	0																																											
	Nickel	450	320	200	100	20	0																																										
	CuZnNi alloy	570	440	320	220	140	120	150	30	0																																							
	Copper	600	470	350	250	170	150	30	0																																								
	Copper-Aluminium	650	520	400	300	220	200	80	50	0																																							
	Brass CuZn	770	640	520	420	340	320	200	170	120	0																																						
	Bronze CuSn	800	670	550	450	370	350	230	200	150	30	0																																					
	Tin	840	710	590	490	410	390	270	240	190	70	40	0																																				
	Lead	930	800	690	590	500	480	360	330	280	160	130	90	0																																			
	Fe Ni25	940	810	690	590	510	490	370	340	290	170	140	100	10	0																																		
	Aluminium Copper	950	820	700	600	520	500	380	350	300	180	150	110	20	10	0																																	
	Cast iron	1000	870	750	650	570	550	430	400	350	230	200	160	70	60	50	0																																
	Carbon steel	1000	870	750	650	570	550	430	400	350	230	200	160	70	60	50	0																																
	Screw-cutting light alloy	1065	935	815	715	635	615	495	465	415	295	265	225	135	115	65	65	0																															
	Light cast alloy	1090	960	840	740	660	640	520	490	440	320	290	250	160	140	90	90	25	0																														
	Aluminium	1095	965	845	745	665	645	525	495	445	325	295	255	165	145	95	95	30	5	0																													
	Carbon steel for heat treatment	1100	970	850	750	670	650	530	500	450	330	300	260	170	160	100	100	35	10	5	0																												
	Al Mg alloy	1100	970	850	750	670	650	530	500	450	330	300	260	170	160	100	100	35	10	5	0																												
	Cadmium	1105	975	855	755	675	655	535	505	455	335	305	265	175	165	105	105	40	15	10	5	0																											
	Pure iron	1105	975	855	755	675	655	535	505	455	335	305	265	175	165	105	105	40	15	10	5	0																											
	AlMgSi alloy	1105	975	855	755	675	655	535	505	455	335	305	265	175	165	105	105	40	15	10	5	0																											
	Chrome	1200	1070	950	850	770	750	630	600	550	430	400	360	270	260	200	200	135	110	105	100	95	95	0																									
	Al Zn Mg alloy	1275	1095	975	875	795	775	655	625	575	455	425	385	295	285	225	225	160	115	130	125	120	120	25	0																								
	Sn Zn white metal	1360	1230	1110	1010	930	910	790	760	710	500	560	520	430	420	410	360	360	295	270	265	260	255	255	160	135	0																						
	Zinc	1400	1270	1150	1050	970	950	830	800	750	630	600	560	470	460	450	400	400	335	310	305	300	295	295	200	175	40	0																					
	Manganese	1470	1340	1220	1120	1040	1020	900	870	820	700	670	630	540	530	520	470	470	405	380	375	370	370	365	365	270	245	110	70	0																			
	Magnesium	1650	1870	1700	1600	1520	1500	1380	1360	1300	1180	1150	1110	1020	1010	1000	950	950	885	860	855	850	845	845	750	725	590	550	480	0																			

Kuva 10. Galvaaninen yhteensopivuustaulukko. Taulukossa luvut kuvaavat metallien välistä potentiaaliero (mV) (Clifix 2018).

Kuvassa 10 esitetyssä taulukossa, pystysuunnassa katsottaessa, punaisen viivan alle jäävät metallit syöpyvät. Kuvasta 10 nähdään, että mitä suurempi kahden eri metallin potentiaaliero sitä voimakkaampaa on galvaaninen korroosio.

Toisin sanoen galvaanista korroosiota voidaan estää, valitsemalla käytettävät metallit, jotka ovat mahdollisimman läheltä toisiaan normaalipotentialitaulukossa tai vastaavasti käyttää apuna kuvan 10 kaltaista yhteensopivuustaulukkoa. Metallien valinnassa tulee välttää suurta katodia suhteessa anodiin. Erilaiset pinnoitteet ja eristeet soveltuvat myös galvaanisen korroosion estämiseen. Metallit voidaan eristää toisistaan tai sähkötekniisissä ratkaisuissa metallit voidaan pinnoittaa, sellaisella metallilla, joka on galvaanisen korroosion näkökulmasta yhteensopiva (Aromaa 2005).

Galvaaninen korroosio on yksi tämän tutkimuksen keskeisiä ongelmia. Käytettävät kaapelikengät tulee valita siten, että galvaanista korroosiota ei pääse syntymään. Esimerkiksi alumiini ja kupari eivät kuvan 10 taulukon mukaan ole keskenään yhteensopivia vaan kupari alkaa syövyttämään alumiinia. Kaapelikenkien ja liittosholkkien valinnassa tulee kiinnittää huomiota materiaaleihin ja kaapelikenkien pinnoitteisiin. Liitoskohta voidaan kuvan 9 mukaisesti käsitellä liitosrasvalla, joka estää kosteuden, eli elektrolyytinä toimivan veden, pääsyn liitoskohtaan ja näin ollen estää kokonaan tai ainakin vähentää galvaanista korroosiota. Sähköisessä liitoskohdassa galvaaninen korroosio syövyttää toista metallia, jolloin liitoskohdan pinta-ala pienenee ja resistanssi kasvaa.

5.3 Piste- ja rakokorroosio sähköisissä liitoksissa

Pistekorroosiossa syöpyminen keskittyy pistemäisesti metallin pinnalle. Pistekorroosiota tapahtuu metallin ollessa passiivtilassa. Pistekorroosio johtuu paikallisista metallin passiivikalvon virheistä tai jos ympäristöolosuhteissa on tavallista syövyttävimpiä aineita. Rakokorroosiota esiintyy raoissa, joissa korroosiota aiheuttava liuos ei pääse vaihtumaan samalla vauhdilla kuin muilla pinnoilla. Yleisimpiä paikkoja ovat liitokset, pulttien ja niittien kantojen alla olevat pinnat sekä kappaleen pinnalla olevien mahdollisten kerros-

tumien alla. Piste- ja rakokorroosiota voidaan estää hyvällä suunnittelulla ja oikeilla materiaalin valinnoilla. Pistekorroosiota voidaan vähentää estämällä liuosten väkevoityminen pinnoille. Rakokorroosiota voidaan estää tiivistämällä kaikki mahdolliset raot siten, ettei niihin voi jäädä korroosiota aiheuttavaa liuosta. Vaihtoehtoisesti raot voidaan suunnitella niin suuriksi, että liuos pääsee vaihtumaan pinnalla (Aromaa 2005: 72.)

5.4 Hankauskorrosio sähköisissä liitoksissa

Hankauskorroosiota (*eng. fretting*) esiintyy, kun kaksi metallia pääsevät hankautumaan toisiaan vasten. Hankautuminen tapahtuu pienellä värähtelevällä liikkeellä. Riittävä värähtelyamplitudi hankauskorroosion syntymiselle on 100 nm tai sitä pienempi amplitudi. Liitoksen kontaktivoimalla on merkitystä hankauskorroosion syntymiseen. Mitä suurempi voima vaikuttaa hankaavien metallien välillä, sitä suurempi on hankauskorrosio. Kosteus taas vähentää hankauskorroosiota. Pintojen viimeistelyllä on myös merkitys hankauskorroosion aiheuttamiin vaurioihin. Hyvin viimeistellyt ja tasaiset pinnat ovat herkempiä hankauskorroosiolle kuin karheat ja epätasaiset pinnat. (Braunovic ym. 2007: 214–225.)

5.5 Muita yleisiä korroosiotyyppejä liitoksissa ja pinnoilla

Korroosiotyyppejä on edellisten tyyppien lisäksi mm. eroosio-, kavitaatio, raerajakorroosio sekä valikoiva liukeneminen ja vetyhauraus. Nämä korroosiotyypit eivät ole tämän työn kannalta oleellisia, mutta ne on silti päätetty mainita sillä ne ovat edellisissä luvuissa esitettyjen korroosiotyyppien lisäksi yleisimpiä korroosiotyyppejä.

Eroosio- ja kavitaatiokorroosion syntyyn tarvitaan voimakkaasti virtaava neste. Voimakas virtaus kuljettaa mukanaan suojaavan korroosiotuotekerroksen muodostumiseen tarvittavat metalli-ionit, jolloin metalli on altis korroosiolle. Eroosio- ja kavitaatiokorroosio on yleensä yhdistelmä mekaanista kulumista ja (sähkö)kemiallista syöpymistä. (Aromaa 2005: 69.).

6 KAAPELIKENGÄT, JATKOHOLKIT JA LIITOSMENETELMÄT

Yleisesti ottaen kaapeleiden yhteen liittämiseen on useita eri komponentteja ja tapoja, kuten esimerkiksi erilaisia ruuvipuristeisia liittimiä ja eristyksen läpäiseviä liittimiä sekä puristustyökaluilla puristettavia putkimallin kaapelikenkiä ja holkkeja (Braunovic ym. 2007: 263–264). Näistä kaksi viimeksi mainittua ovat yleisesti käytössä staattorikäämin liitoksissa (ABB 2018d). Kaapelikenkiä ja jatkoholkkeja on saatavana usein eri kokoisina, eri materiaalista ja erilaisilla pinnoitteilla (ABB 2018d; Klauke 2018a; Ouneva 2019). Kaapelikengät voivat olla avoimia, hitsattuja tai putkimaisia (IEC 60352-2 2018: 9). Tässä työssä tutkittavat kaapelikengät ovat avoimia tai putkimallisia kenkiä ja jatkoholkit putkimaisia. Työssä tutkittavien kaapelikenkien ja jatkoholkkien koot ovat poikkipinta-alaltaan 4–16 mm². Tällaiset koot ovat tyypillisiä pienten, alle 250-runkokoon moottoreissa. Staattorikääminnän käämin pään poikkipinta-ala riippuu käytettävien lan-kojen poikkipinta-alasta, mutta käämin päihin liitettävät liitántäkaapelit ovat standardikokoisia (ABB 2018a). IEC-standardissa IEC 60228 (Conductors of insulated cables) on lueteltu standardipoikkipinta-alat kuparisille johtimille yksikössä mm². Standardipoikkipinta-alat ovat 0,5 mm², 0,75 mm², 1 mm², 1,5 mm², 2,5 mm², 4 mm², 6 mm², 10 mm², 16 mm², 25 mm², 35 mm², 50 mm², 70 mm², 95 mm², 120 mm², 150 mm², 185 mm², 240 mm², 300 mm², 400 mm², 500 mm², 630 mm², 800 mm² ja 1000 mm².

Luetelluista poikkipinta-aloista 0,5 mm² ja 1 mm² kokoiset liitántäkaapelit eivät ole yleisesti käytössä ABB:n oikosulkumoottoreissa (ABB 2018a). Alle 450-runkokoon moottoreissa ei myöskään suurimmat poikkipinta-alat ole käytössä liitántäkaapeleiden poikkipinta-aloina. (ABB 2018a.) Kyseisessä standardissa alumiinijohtimien standardipoikkipinta-alat eroavat kuparijohtimien pinta-aloista siten, että ne alkavat vasta koosta 10 mm². Muuten alumiinijohtimien standardipoikkipinta-alat ovat samat kuin kuparijohtimien. IEC-standardin mukaisten poikkipinta-alojen lisäksi Amerikassa ja Kanadassa on käytössä oma poikkipinta-ala standardi AWG (American Wire Gauge) (IEC 60228 2004: 4).

Kaapelikenkävalmistajia ovat mm. Ouneva, JST, Klauke ja TE Connectivity. Eri valmistajien tuotekatalogeja selailemalla yleisimmäksi kaapelikenkä- ja holkkimateriaaliksi osoittautuu kupari, joka on päällystetty tinalla. Tinapinnoitteella on tarkoitus parantaa

kaapelikengän tai holkin korroosionkestävyyttä (Braunovic ym. 2007). Alumiinikaapeleille on olemassa omia, alumiinista valmistettuja kaapelikenkiä ja jatkoholkkeja. Muitakin kaapelikenkämateriaaleja on, esimerkiksi niklattu ruostumaton teräs, joita saksalainen kaapelikengä- ja jatkoholkkeja valmistava Klauke suosittelee näitä kaapelikenkiä erittäin kuumiin olosuhteisiin. ABB:n moottoreissa käytettävät kaapelikengät ovat suurimmaksi osaksi aiemmin mainittuja tinapinnoitettuja kuparista valmistettuja kaapelikenkiä (ABB 2018d). Kuvassa 11 on vasemmalla esimerkkinä putkimallinen, tinapinnoitettu kuparinen kaapelikengä sekä oikealla levymallinen kaapelikengä, jossa liitoskohta on taivutettu pyöreäksi ja hitsattu kiinni päältä. tämän lisäksi levymallin kaapelikengä voi olla avonainen, jolloin sivut taitetaan ja puristetaan johtimen päälle (IEC 60352-2 2018: 9).



Kuva 11. Putkimallin kaapelikengä (a) ja levymallin kaapelikengä (b). Materiaalina kummassakin on kupari, joka on päällystetty tinalla. (Klauke 2018a). Kuvaa on muokattu.

Kaapelikengien ja jatkoholkkien puristamiseen voidaan käyttää mekaanista tai hydraulista puristamiseen tarkoitettua työkalua. Puristuksien muoto ja lukumäärä vaihtelevat erikokojen ja valmistajien mukaan. Erilaisia puristuksia ovat esimerkiksi kuusikulma-, V- ovaali-, neliö-, B, kara, kaksoiskara-, VM- ja Trapez-puristus (Phoenix Contact 2018). Puristuskertojen eli yksittäisten eri kohtaan tehtävien puristusten määrä vaihtelee myös valmistajan ja tuotteen mukaan. Yleensä valmistajalla on tapana ilmoittaa, esimerkiksi tuotteen datalehdellä, minkälaisella työkalulla puristus on tehtävä ja lisäksi, minkä muotoinen ja kuinka monta puristusta tarvitaan. Erilaisia puristusmuotoja on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Erilaisia puristusmuotoja. Ylävasemmalta alkaen neliö-, kuusikulma eli Hex-, Trapez-, ovaali-, B-, kara-, kaksoiskara-, VM- ja nelikarapuristus. (Phoenix Contact 2018). Kuvaa on muokattu.

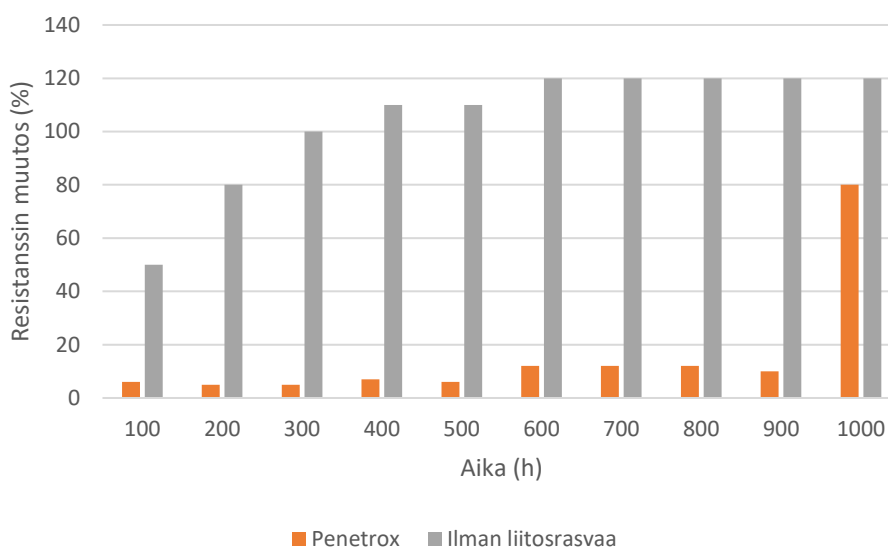
Kuvan 12 esimerkkipuristusprofiilit ovat Phoenix Contact nimisen yrityksen puristimilla mahdollisia puristettavia profiileja. Muita puristimia valmistavia yrityksiä ovat mm. Klauke ja Novopress. Erilaiset puristusprofiilit toimivat erilaisilla ja erikokoisilla kaapeleilla. Esimerkkinä Phoenix Contact suosittelee Hex-puristusta $0,5\text{--}6\text{ mm}^2$ kokoisille johtimille, jotka puristetaan eristämättömään putkimalliseen kaapelikengään. Muita kohteita Hex-puristukselle ovat valokuitu- ja koaksiaaliliittimien puristukset. Isommille johtimille ($10\text{--}50\text{ mm}^2$) taas Phoenix Contact suosittelee VM-puristusta. (Phoenix Contact 2018.)

6.1 Alumiinijohtimelle tarkoitetut kaapelikengät ja jatkoholkit

Alumiinille tarkoitetut kaapelikengät ja jatkoholkit ovat yleensä alumiinista valmistettu ja näin vältetään mm. alaluvussa 4.2 esitetty galvaaninen korroosio, koska materiaali on sama johtimella ja kaapelikengällä (tai jatkoholkilla). Vertailemalla eri kaapelikengävalmistajien katalogeista löytyviä kaapelikengkiä voidaan havaita, että alumiinista valmistetut kaapelikengät ovat kevyempiä ja kookkaampia verrattuna esimerkiksi kuparista valmis-

tettuihin kaapelikenkiin. Alumiinin oksidikerroksen muodostumista vastaan alumiinikaapelille tarkoitetuissa kaapelikengissä on yleensä valmiiksi liitosrasvattu sisäosa. Liitosrasva tuhoaa oksidikerroksen alumiinin pinnalta ja estää sen uudelleen muodostumista. (Klauke 2018b.) Liitosrasvan lisäksi kaapelikengän liitoskohdassa voi olla erikoinen kuvio, joka hajottaa oksidikerroksen (Schmidth, Seipel & Stabroth 2015).

Alumiinille tarkoitettujen kaapelikengien liittämässä liitettävä johdin on harjattava teräsharjalla, jotta alumiinin pinnassa oleva oksidikerros saadaan jo tässä vaiheessa poistettua. Harjaamisen jälkeen suositellaan käytettäväksi vielä erikseen liitosrasvaa oksidikerroksen uudelleen syntymisen estämiseksi. Liitosrasvaksi soveltuu esimerkiksi Penetrox -liitosrasva. (Ouneva 2018a.) Kuvassa 13 on esitetty Penetrox -liitosrasvan vaikutus alumiinin ja tinalla pinnoitetun kuparin liitokseen. Kyseessä on tinapinnoitettu kuparikisko, johon on ruuviliitoksella liitetty alumiinikaapelikengä. Mittaukset on tehty suolapitoisessa ympäristössä (Braunovic ym. 2007: 103).



Kuva 13. Liitosrasvan käytön vaikutus alumiinin ja tinalla pinnoitetun kuparin liitokseen suolapitoisessa ympäristössä. (Braunovic ym. 2007: 103) Kuvaa on muokattu.

Kuten kuvasta 13 nähdään, liitosrasvan käyttö vähentää tehokkaasti resistanssin kasvua liitoskohdassa verrattuna liitokseen, jossa ei ole käytetty liitosrasvaa. Penetrox -liitosras-

van tuoteselosteessa liitosrasvan koostumus on pääosin sinkkioksidia. Galvaanisen korroosion estämisen lisäksi rasva estää tehokkaasti myös hapettumista. Tämän vuoksi sitä suositellaan käytettäväksi myös alumiinijohtimen ja alumiinikaapelin liitokseen (Penetrox 2019).

Alumiinikaapeleille tarkoitettuja jatkoholkkeja ja kaapelikenkiä on saatavana myös kuparista valmistettuja. Tällöin liitospinta on voitu valmistaa esimerkiksi tinapinnoitetusta messingistä. Esimerkkinä Ouneva oy:n valmistamassa JHR-sarjan, alumiini- ja kuparijohtimille soveltuvassa jatkoholkissa, valmistusmateriaali on kupari, joka on päällystetty elektrolyyttisesti tinalla. Holkin sisällä on elektrolyyttisesti tinalla päällystetty, messingistä valmistettu rasteriverkko (Ouneva 2018b). Myös esimerkiksi TE Connectivityn valmistamat Copalum-sarjan kaapelikengissä valmistusmateriaalina on tinapinnoitettu kupari ja kaapelikengän sisäpuolella on tinapinnoitettu messinkinen rasteriverkko, jonka tarkoituksena on rikkoa alumiinin oksidikerros (TE 2018).

Alumiinijohtimelle tarkoitettuja kaapelikenkiä ja jatkoholkkeja on olemassa myös ns. bimetallisia versioita. Bimetallijatkoholkit ovat tarkoitettu alumiini- ja kuparijohtimien liitokseen, jossa alumiinijohdinta halutaan jatkaa kuparijohtimella. Jatkoholkin toinen pää on valmistettu kuparista ja toinen alumiinista. Alumiini ja kupari on liitetty toisiinsa siten, että liitoskohtaan ei pääse galvaaniseen korroosioon syntyyn tarvittavaa elektrolyyttiä esimerkiksi vettä. Jatkoholkkien lisäksi on olemassa kaapelikenkiä, joissa periaate on sama. Tällöin kaapelikengän putkiosa on alumiinia, mutta liitospää on kuparia. (Klauke 2018c.) Bimetallikaapelikengä ja jatkoholkki on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Bimetallikaapelikenkä (a) ja vastaavanlainen jatkoholkki (b) (Klauke 2018a)
Kuvaa on muokattu.

Alumiinikämminnällä toteutetussa oikosulkumoottorissa bimetallijatkoholkit voivat olla yksi mahdollisuus pienentää galvaanisen korroosion riskiä ja samalla pienentää alumiinin liitospinnoille syntyvän oksidikerroksen muodostumisen riskiä. Alumiinikämmien päähän voidaan puristaa bimetallijatkoholkki, jonka jälkeen holkin toiseen päähän voidaan puristaa kuparista valmistetut liitántäkaapelit tai -johtimet, jotka viedään liitántäkoteloon. Tällöin liitántäkaapeleiden päässä voidaan käyttää samoja kaapelikenkiä kuin kuparilangalla käämityssä moottorissa.

Kuparista valmistettujen, pelkällä tinalla pinnoitettujen, kaapelikenkien käyttö alumiinijohtimen kanssa saattaa olla riskialtis galvaaniselle korroosiolle. Esimerkiksi tinapinnoitettujen virtakiskojen liitoksissa Braunovic ym. esittävät teoksessaan *Electrical contacts* (Braunovic ym. 2007), että pelkän tinapinnoitteen käyttö galvaanisen korroosion ehkäisemiseksi ei ole optimaalista kahdesta pääsystä. Ensimmäinen tinapinnoite on herkkä hankauskorroosiolle. Tämä aiheuttaa liitoksessa resistanssin kasvua ja pahimmassa tapauksessa liitos pettää ja virtapiiri muuttuu avoimeksi. Toiseksi tina voi muodostaa kuparin kanssa liitosta haurastuttavan yhdisteen. Pinnoitetta tärkeämmäksi teoksessa esitetään liitosrasvan käyttö, josta esimerkki esitettiin jo kuvassa 13.

6.2 Hot crimping -menetelmä

Hot crimping -menetelmän käyttö on kasvanut paljon autoteollisuudessa. Menetelmää käytetään etenkin sähköautojen liitoksissa, joissa kulkee suuret virrat. Tällaisia kohteita sähköautoissa ovat akkujen, sähkömoottorin ja invertterin väliset liitokset. Hot crimping menetelmällä toteutetulla liitoksella on pienempi resistanssi verrattuna perinteisellä, puristettavalla kaapelikengällä tai jatkoholkilla tehtyyn liitokseen. Pienentynyt resistanssi, johtaa pienempiin lämpöhäviöihin. Näin liitoskohdan luotettavuus ja laitteen hyötysuhde paranee. Toinen ala, jossa kyseisen liitosmenetelmän käyttö on lisääntynyt, on uusiutuvan energian tuotanto, jossa ollaan tekemisissä suurten virtojen kanssa. Näitä ovat mm. tuuli-voimalat, vesivoimalat ja aurinkovoimalat. (Amada 2018.)

Hot crimping -menetelmässä puristettavien kaapelikenkien tai jatkoholkkien puristaminen tehdään mekaanisen puristamisen lisäksi johtamalla sähkövirtaa liitoskohtaan puristamisen yhteydessä. Hot crimping -menetelmä on ns. resistanssihitsauksen (eng. resistance welding) alalaji. Hot crimping -menetelmässä johtimena käytetään kaapelikengää, jolloin kaapelikengä pitää johdinlangat paikoillaan. Sähkövirta kuumentaa liitoksen ja puristamalla kaapelikengästä ja johdinlangoista saadaan yhtenäinen kappale. (Amada 2018.)

Kuvasta 15 voidaan nähdä hot crimping -hitsauslaitteisto sekä menetelmällä puristetun kaapelikengän poikkileikkaus.



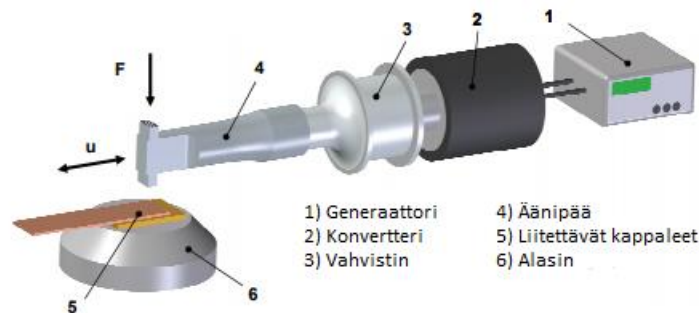
Kuva 15. Hot crimping -hitsauslaitteiston hitsauspää ja johtimeen liitettävä kaapelikengä (a). Puristetun kaapelikengän poikkileikkaus (b). (Amada 2018.) Kuvaa on muokattu.

Kuvasta 15 voidaan nähdä Amada Miyachi Europen valmistaman hitsauslaitteiston hitsauspäät, jotka tuottavat sähkövirran avulla millisekunneissa noin 700 °C lämpötilan. Kuvassa oikealla voidaan nähdä liitoksen poikkileikkaus. Liitoksesta voidaan havaita lankojen hitsautuneen hyvin kaapelikenkään. Hot crimping -menetelmän etuja ovat mm. kestävä rakenne. Koska kaapelikenkä ja johdinlangat liitetään yhdeksi kappaleeksi, liitoksella on hyvä vetolujuus eikä liitos heikkene tärinästä tai korkeasta lämpötilasta. (Amada 2018.)

Hot crimping -menetelmällä voidaan liittää myös alumiinijohtimia. Esimerkiksi hot crimping -laitteistoja valmistavan Strunk Connect:n mukaan yksi sovellus sähköautojen sähköisissä liitoksissa hot crimping -menetelmälle on kuparista valmistettujen tinapinnoitettujen kaapelikenkien liittäminen alumiinijohtimeen. Muita menetelmän soveltamiskohteita ovat kuparijohtimen liittäminen mm. hopeapinnoitettuihin sekä niklattuihin kaapelikenkiin. (Strunk 2019.) Näin ollen hot crimping -menetelmä voi olla myös mahdollinen alumiinikääminnällä toteutettujen oikosulkumoottoreiden liitäntäjohtimien kaapelikenkien liitokseen. Tällöin voitaisiin suoraan käyttää jo käytössä olevia kaapelikenkiä.

6.3 Ultraäänihitsaus

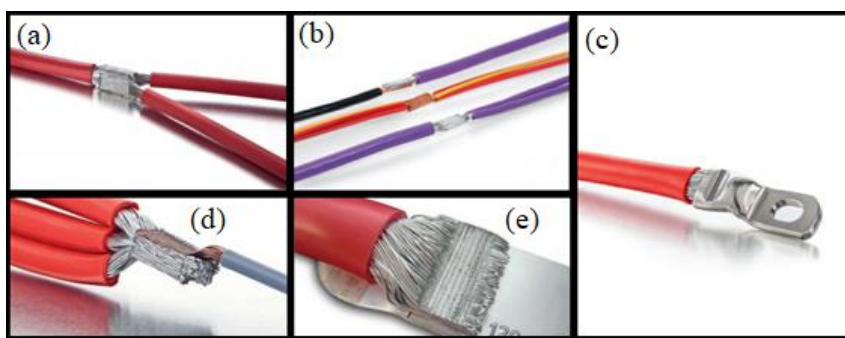
Ultraäänihitsauksessa periaatteena on yhdistää kappaleet toisiinsa hankaamalla niitä toisiaan vasten hyvin suurella taajuudella. Ultraäänihitsauksella on monia sovellusaloja kuten esimerkiksi pakkaus-, elintarvike-, tekstiili- ja ajoneuvoteollisuus. Ultraäänihitsauksella on mahdollista liittää yhteen erilaisia metalleja sekä muoveja. Ultraäänihitsauslaitteiston keskeisiä komponentteja ovat generaattori, konverteri, vahvistin ja äänipää. (Ritmacon 2019; Wagner, Balle & Eifler 2010 :935) Komponentit ovat esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Periaatekuva ultraäänihitsauslaitteistosta. Kuvassa F kuvaa voimaa ja u värähtelyn nopeutta (Wagner ym. 2010: 935) Kuva muokattu.

Kuvassa 16 esitetyn generaattorin avulla 50 Hz verkkovirta muutetaan vaihtovirraksi, jonka taajuus voi olla 15–70 kHz. Yleisimmin käytetty taajuus ultraäänihitsauksessa on 20 kHz. Konvertterilla sähköenergia muutetaan saman taajuiseksi mekaaniseksi liikkeeksi. Näin saadaan aikaan hyvin pieni amplitudinen liike. Vahvistimen avulla liike välitetään äänitorveen. Vahvistimen avulla värähtelyn taajuutta voidaan, joko nostaa tai laskea. Liitettävät kappaleet asetetaan päällekkäin alasin päälle, jonka jälkeen äänipää painetaan liitettävien kappaleiden päälle. Äänitorven kautta suuritaajuuksinen, pieni amplitudinen liike ohjataan liitettäviin kappaleisiin, samalla äänitorvella painetaan kappaleita voimalla F . Käytettävä taajuus riippuu liitettävien kappaleiden koosta. Pienille kappaleille, joita voivat olla mm. elektroniikkateollisuudessa liitettävät kappaleet, voidaan käyttää yli 40 kHz taajuuksia. Suuremmille kappaleille käytetään edellä mainittua noin 20 kHz taajuuksia. Alle 20 kHz taajuuksien käyttäminen on harvinaista, koska tällöin häviöt kasvavat ja hitsaukseen käytettävä amplitudi kasvaa. Tällöin liitettävät kappaleet voivat vaurioitua. (Vlad 2007: 17–20.)

Autoteollisuudessa ultraäänihitsauksen sovellus on sähköjohtojen liittokset. Tutkimuksia löytyy myös alumiinin ja kuparin yhteen liittämistä ultraäänihitsauksen avulla. Esimerkiksi ultraäänihitsauslaitteistoja valmistava yritys nimeltä Telesonic esittää internet sivuillaan useita erilaisia autoteollisuuden sovelluksia joihin ultraäänihitsausta voidaan käyttää. Kuvasta 17 voidaan nähdä kyseisen yrityksen havainnollistavat kuvat erilaisista mahdollisista sovelluksista.



Kuva 17. Erilaisia ultraäänihitsauksen sovelluksia autoteollisuudessa. Alumiinijohtimien yhteen liittäminen (a), alumiini-alumiini, kupari-kupari ja alumiini-kupari liitokset (b), alumiinijohtimen liittäminen putkimalliseen, kuparista valmistettuun kaapelikenkään (c), useamman alumiini johtimen ja kuparijohtimen liitokset (d) ja alumiinijohtimen liittäminen levymalliseen kaapelikenkään (e). (Telesonic 2019.) Kuva on muokattu.

Erilaisten auton muoviosien lisäksi mielenkiintoisia sovelluksia ovat alumiinijohtimien liittäminen kaapelikenkään sekä alumiinijohtimien erilaiset liitokset ultraäänihitsauksen avulla. Kuten kuvasta 17 voidaan nähdä, niin ultraäänihitsauksella voidaan liittää suoraan toisiinsa kupari- ja alumiini johdin. Ultraäänihitsauksella voidaan liittää alumiini johdin kuparista valmistettuihin kaapelikengiin. Kaapelikengät voivat olla tinapinnoitteen lisäksi myös niklattuja tai hopeoituja. Ultraäänihitsauksella voidaan liittää useampia alumiinijohtimia toisiinsa.

Ultraäänihitsaus voisi näin ollen soveltua alumiinilangalla käämityn oikosulkumoottorin staattorin liitoksiin. Esimerkiksi ultraäänihitsausta voisi olla mahdollista käyttää liittämään alumiini johdin levymalliseen kaapelikenkään tai putkimalliseen kuparista valmistettuun kaapelikenkään.

6.4 Standardien asettamia vaatimuksia kaapelikengien liitoksille

Mekaanisesti puristetuille kaapelikengille on olemassa IEC-standardi IEC61238-1-1 (Compression and mechanical connectors for power cables - Part 1-1: Test methods and requirements for compression and mechanical connectors for power cables for rated volt-

ages up to 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) tested on non-insulated conductors). Standardin sovellusalueeseen kuuluvat puristettavat ja mekaaniset liittimet, joita käytetään nimellisvirraltaan alle 1 kV voimakaapeleiden liittämiseen. Standardi käsittää liittimet, joilla kytketään poikkipinta-alaltaan 2,5–1200 mm² kuparikaapeli tai vastaavasti 16–1200 mm² alumiinikaapeli (IEC 61238 2018: 7). Standardi määrittää erilaisia testejä liittimien tyyppitaukseen. Näitä testejä ovat mm. kaksi eri vaihtovirralla tehtävää lämmityskoetta, virtatestejä sekä mekaanisia testejä. (IEC 61238 2018: 7). Yleiset testien vaatimukset on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Yleiset läpäisyvaatimukset IEC 61238-1 standardin mukaan testatuille liittimille (IEC 61238-1 2018: 40).

General requirements	Assessment in IEC 61238-1
Type tested connector shall show the same behaviour regarding the following aspects:	Related test parameter and limit values covering the general requirement:
1 All tested connectors of a specific design shall be similar in resistance after installation.	The initial scatter δ between the six values of k_0 before heat cycling shall not exceed the value 0,30 as given in Table 3.
2 The resistances of each tested connector shall remain stable during the entire electrical test, including the short circuit test, if applicable.	The resistance factor ratio λ of each tested connector shall not exceed 2,0 as given in Table 3.
3 The resistance of each tested connector shall not rise excessively during the last 750 heat cycles and all connectors shall show similar behaviour.	The mean scatter β shall not exceed the value 0,30 and the change in resistance factor D shall not exceed 0,15 as given in Table 3.
4 The connectors shall never overheat during any phase of the electrical test.	For each specimen the temperature of the connector during current-heating shall not exceed that of the reference conductor when measured as given in Table 3.
5 If applicable, the connector shall withstand a specified pull-out force related to conductor size and conductor material to guarantee the required basic mechanical tensile strengths occurring in service.	Mechanical tensile strength for all connectors except of Class 0: no slipping shall occur at the entrance of installed connectors after applying the related mechanical tensile force given in Table 4.

Taulukosta 2 nähdään yleiset läpäisyvaatimukset IEC 61238-1 standardin mukaan testatuille liittimille. Vasemmalla on esitetty yleinen vaatimustaso ja oikealla on esitetty standardista löytyvä tarkempi määritelmä ko. vaatimukselle.

Tässä työssä tutkittavien kaapelikenkien ja jatkoholkkien tutkimiseen käytetään vain vetolujuuden testausta. Muut standardin testit ovat pitkäkestoisia, jonka vuoksi tässä työssä on päädytty tekemään yksinkertainen vanhennuskoe. Vetolujuudelle on IEC 61238-1-1 standardissa määritelty taulukon 3 mukaiset vaatimukset.

Taulukko 3. Vetolujuudet erilaisille kaapelityypeille (IEC 61238-1-1: 25). Taulukossa A on poikkipinta-ala. Taulukko käännetty suomeksi.

Luokka	Johdinmateriaali	Poikkipinta-ala A (mm ²)	Vetolujuus (N)
Luokka 0	Alumiini	-	Ei testausta
	Kupari	-	Ei testausta
Luokka 1	Alumiini	≤ 500	40 x A
		≥ 630	20 000
	Kupari	≤ 300	60 x A
		≥ 400	20 000
Luokka 2	Alumiini	≥ 630	40 x A
	Kupari	≥ 400	60 x A

Taulukossa 3 kuvatut kaapeliluokat 0–2 on määritelty IEC 61238-1-1 standardissa siten, että luokan 0 kaapelit ovat sellaisia, joihin ei kohdistu lainkaan voimaa. Luokan 1 kaapelit ovat sellaisia, joiden vetolujuus on alle 500 mm² alumiinijohtimella poikkipinta-alan lukuarvo neliömillimetreinä kertaa 40 tai yli 630 mm² johtimella 20 000 N. Vastaavasti kuparijohtimella luokan 1 kaapeli on sellainen, jonka vetolujuus alle 300 mm² poikkipinta-alan johtimella on johtimen poikkipinta-alan lukuarvo neliömillimetreinä kertaa 60 tai yli 400 mm² johtimella 20 000 N.

IEC 61238-1 standardin lisäksi puristetuille kaapelikengille on olemassa erillinen standardi IEC 60352-2 (Solderless connections - Part 2: Crimped connections - General requirements, test methods and practical guidance). Kyseisen standardin soveltamisalana ovat pienet 0,05–10 mm² poikkipinta-alan johtimen kaapelikengät. Kyseisen standardiin sovellettavat kaapelikengät ovat puristettavasta kohdasta joko avoimia, koneistettuja tai hitsaamalla suljettuja. Tässä työssä tutkittavista kaapelikengistä pienet, 4 mm² koon kaapelikengät kuuluvat tämän standardin piiriin. Toisin kuin IEC 61238-1-1 standardissa, IEC 60352-2 standardissa vetolujuus on määritelty kullekin johdinpoikkipinta-alalle taulukon 4 mukaisesti.

Taulukko 4. IEC 60352-2 standardin mukaiset vetolujuudet eri kokoisille kaapeliken-
gille (IEC 2013: 14) Taulukko käännetty suomeksi ja taulukkoa muokattu.

Johtimen poikkipinta-ala (mm²)	Voima (N)
0,05	6
0,08	11
0,12	15
0,14	18
0,22	28
0,25	32
0,32	40
0,5	60
0,75	85
0,82	90
1	108
1,3	135
1,5	150
2,1	200
2,5	230
3,3	275
4	310
5,3	255
6	360
8,4	370
10	380

7 KOEKAPPALEIDEN VETO- JA LÄMPÖVANHENNUSKOKEET

Erilaisia kaapelikenkiä ja jatkoholkkeja testataan vetokokeilla ja lämpövanhennuskokeella. Testeissä käytettävä alumiinista valmistettu käämilanka on paksuudeltaan 1,12 mm, joten vertailtava kuparilanka valitaan saman paksuiseksi. Testattaviksi kokonaispoikkipinta-aloiksi valittiin 4 mm², 10 mm² ja 16 mm². Kyseisiä poikkipinta-aloja ei voida tarkasti saavuttaa, koska käytössä on vain yhden koon käämilankaa. Näin ollen tutkittavat koekappaleet valmistetaan siten, että käytetään rinnakkain neljää, 10, ja 16 käämilankaa, jotka puristetaan tutkittaviin kaapelikenkiin ja jatkoholkkeihin. Tällöin päästään tarpeeksi lähelle haluttuja poikkipinta-aloja. Lisäksi tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia, koska kummallakin materiaalilla käytettävän langan paksuus ja lukumäärä ovat samat.

Tutkittavat kokoluokat valittiin siksi että, tarkasteltaessa alle 16 mm² kokoluokan kaapelikenkiä ja jatkoholkkeja, kyseisissä kokoluokissa saatavuus on monipuolisin ja jo käytössä olevista kuparista valmistetuista kaapelikengistä ja jatkoholkeista löytyy samantyyppiset vertailukappaleet. Eri valmistajien tuotekatalogeja selailemalla selviää, että alumiinista valmistettujen kaapelikenkien saatavuus rajoittuu hyvin pitkälti 16 mm² kokoluokkaan. Kuparista valmistettuja kaapelikenkiä sen sijaan löytyy hyvin laaja valikoima kaikille standardikokoluokille. Alumiinista valmistettuja kaapelikenkiä valmistavan Klauken katalogista löytyy kuitenkin 16 mm² lisäksi myös 10 mm² poikkipinta-alan alumiinijohtimelle sopivia kaapelikenkiä, joten 16 ja 10 mm² kokoluokan tutkittaviksi kaapelikengiksi valittiin Klauken alumiinista valmistetut kaapelikengät. Klauken valmistamissa kaapelikengissä myös kaapelikengän pulttikoko vastaa tuotannossa jo käytössä olevia pulttikokoja. Pulttikoko on 16 mm² kaapelikengissä M10 ja 10 mm² kaapelikengissä M6. Esimerkiksi Ounevan tuotekatalogista löytyy alumiinista valmistettuja kaapelikenkiä, mutta pienemmissä kaapelipoikkipinta-aloissa on saatavana vain M8 pulttikoolla olevia kaapelikenkiä. ABB:n oikosulkumoottoreissa yleisesti käytettävät liitinalustan pultit ovat alle 250- runkokoon koneissa joko M10, M6, M5 (ABB 2018c). Eri kaapelikenkävalmistajien tuotekatalogeja selailemalla käy myös ilmi, että alumiinista valmistetut kaa-

pelikengät ja jatkoholkit ovat mitoitukseltaan aina suurempia verrattuna vastaaviin kuparista valmistettuihin kaapelikenkiin ja jatkoholkkeihin. Tämä on hyvä ottaa mitoituksessa huomioon.

Alle 10 mm² kokoluokissa ei eri valmistajilta löydy lainkaan alumiinista valmistettuja kaapelikenkiä tai jatkoholkkeja. Alumiinijohtimelle tarkoitettuja Amerikan johdinpoikkipinta-alastandardin (AWG) mukaisia kaapelikenkiä ja jatkoholkkeja löytyy mm. TE Connectivityltä. Poikkipinta-alan 4 mm² tutkittava kaapelikengä valittiin TE Connectivityn Copalum -sarjasta. Kyseinen kaapelikengä on valmistettu kuparista, joka on pinnoitettu tinalla. Johtimen liitoskohtaan on lisätty messinkinen tinapinnoitettu rasteriverkko. Valmistaja ilmoittaa, että kyseistä kaapelikengää voidaan käyttää sekä kupari- että alumiinijohtimen kanssa. Kyseisten kaapelikenkien kooksi on ilmoitettu 12–10 AWG, jotka vastaavat poikkipinta-aloja 3,31–5,27 mm². Näin ollen standardikoon 4 mm² kaapeleita voidaan käyttää ko. kaapelikengän kanssa. Lisäksi pulttikoko kyseisessä kaapelikengässä on semmoinen, joka vastaa M6 pulttikokoa.

Jatkoholkeista tutkittaviksi holkeiksi valittiin Ounevan 16 mm² koon alumiini- ja kuparijohtimille soveltuva jatkoholkki. Kyseinen holkki valittiin tutkittavaksi, koska se on ulkomitoiltaan saman kokoinen kuin tuotannossa käytettävä 16 mm² jatkoholkki. Ounevan jatkoholkin sisällä on myös samanlainen messinkiverkko kuin TE Connectivityn Copalum -sarjan kaapelikengässä. Verkko pienentää hieman jatkoholkin sisähalkaisijaa. Toiseksi tutkittavaksi jatkoholkiksi valittiin Klauken bimetallijatkoholkki. Kyseisen holkki soveltuu 10 mm² johtimelle. Mitoitukseltaan kyseinen holkki on selvästi tuotannossa käytettävään, saman kokoluokan johtimelle sopivaa, holkkia pidempi. Bimetalholkki valittiin tutkimuksiin mukaan, koska haluttiin testata kuinka bimetallinen liitos toimii.

7.1 Koekappaleiden lämpövanhennuskokeet

Lämpövanhennuskokeiden tarkoituksena on simuloida kaapelikenkien ja jatkoholkkien liitosten käytönaikaista vanhenemista. Vanhennuskoe suoritetaan sääkaapissa, jonka

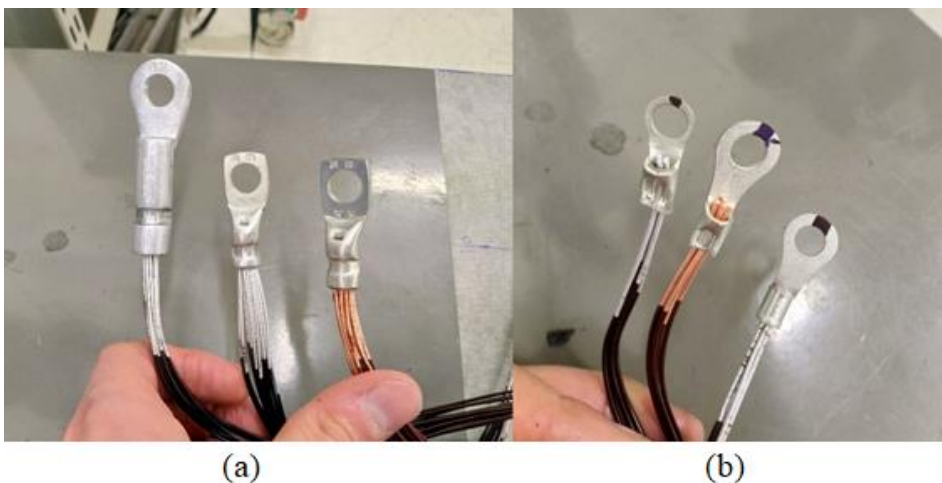
avulla koekappaleet voidaan altistaa nopealle lämpötilan vaihtelulle ja tällä tavoin simuloida koekappaleiden vanhenemista. Kaapelikengille ei löydy IEC-standardista sääkaapissa tehtävää vanhennuskoetta, mutta esimerkiksi riviliittimille löytyy sääkaapissa tehtävä standardin IEC 60947-7-2 (Low-voltage switchgear and controlgear - Part 7-2: Ancillary equipment - Protective conductor terminal blocks for copper conductors) mukainen lämpövanhennusmalli. Standardista löytyvää lämpötilasyklimallia päätettiin käyttää tässä tutkimuksessa. Standardin mallissa sääkaapin alkulämpötilaksi asetetaan 40 °C astetta. Tämän jälkeen lämpötila nostetaan 85 °C lämpötilaan ja pidetään kyseisessä lämpötilassa 10 minuuttia. Tämän jälkeen koekappaleiden annetaan jäähtyä noin 30 °C asteeseen. Jäähtynyt lämpötila pidetään yllä 10 min, jonka jälkeen lämpötila nostetaan taas lämpötilaan 85 °C, jossa koekappaleet ovat jälleen 10 min. Tämä muodostaa yhden jakson. Standardin mukaan jaksoja suoritetaan 192. Kaapelikengien tutkimiseen päätettiin käyttää samaa aikasykliä, mutta ylin lämpötila 85 °C päätettiin korottaa lämpötilaan 100 °C.

Lämpövanhennuskoetta varten valmistettiin kolmea eri kaapelikokoa: 4 mm², 10 mm² ja 16 mm². Koekappaleita tehtiin kolmella erilaisella kombinaatiolla: kuparilangalla kelattu vyyhti johon kumpaankin päähän puristettiin tuotannossa käytettävät kaapelikengät, alumiinilangalla kelattu vyyhti johon puristettiin myös tällä hetkellä tuotannossa käytössä olevat kaapelikengät sekä alumiinilangalla kelattu vyyhti johon kumpaankin päähän puristettiin tutkittaviksi valitut alumiinikaapelille tarkoitetut kaapelikengät. Kustakin koosta ja kombinaatiosta kelattiin yhteensä kaksi vyyhteä. Kaapelikengien lisäksi kelattiin alumiinilangasta vyyhdit, johon puristettiin molempiin päihin Klauken bimetallijatkoholkki, sekä kaksi vyyhteä, johon puristettiin molempiin päihin Ounevan alumiinikaapelille tarkoitettu jatkoholkki. Näille vertailukohteeksi kelattiin kuparilangasta vyyhdit, johon puristettiin tuotannossa käytettävät jatkoholkit. Kuvassa 18 on havainnollistava kuva lämpövanhennettavista koekappaleista.



Kuva 18. Lämpövanhennettavat koekappaleet

Kuva 19 havainnollistaa kaapelikengkiä ja käytettyjä puristusmenetelmiä. Kaikki tutkittavat koekappaleet on puristettu kullekin kokoluokalle tuotannossa käytettävällä puristusmenetelmällä. Puristuksia tehtiin vain yksi kullekin koekappaleelle. Tällöin kontaktipinta on kullekin kokoluokalle verrannollinen.



Kuva 19. 16 mm² kokoluokan alumiinikaapelikengkiä ja tuotannossa käytössä olevat kaapelikengät puristettuina sekä alumiini ja kuparijohtimeen (a) ja vastaavat koekappaleet kokoluokassa 4 mm² (b).

Jatkoholkkien osalta huomioitavaa on, että Ounevan kuparista valmistetun alumiinijohtimelle soveltuvan jatkoholkin sisähalkaisija on jonkin verran pienempi kuin tuotannossa käytettävän jatkoholkin. Näiden holkkien muut mitat ovat kuitenkin samat. Pienemmän sisähalkaisijan takia, holkin sisään ei saatu mahtumaan kaikkia 16 lankaa, jotka mahtuivat kuitenkin tuotannossa käytössä olevaan holkkiin. Vaikutus testituloksiin on todennäköisesti pieni, sillä vain yksi lanka jouduttiin jättämään holkin ulkopuolelle. Tämä on kuitenkin hyvä ottaa testituloksissa huomioon.

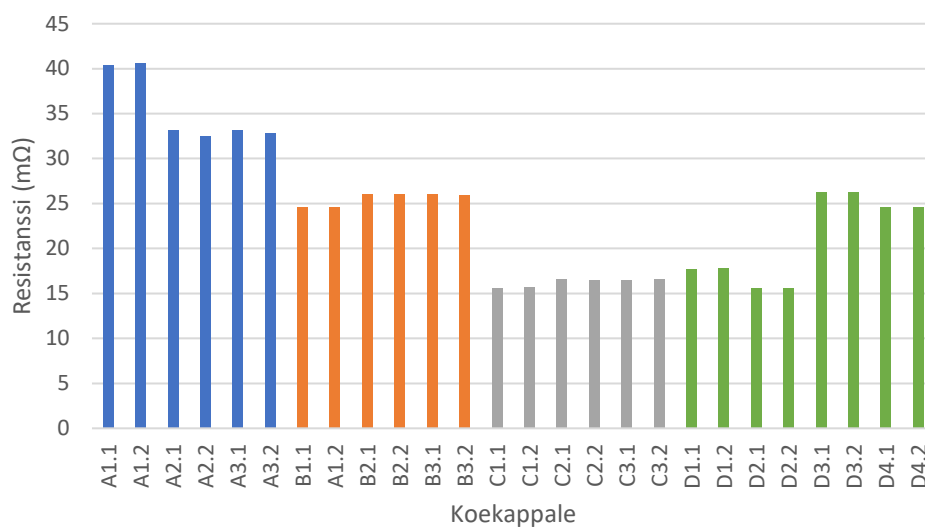
7.1.1 Resistanssin mittaus koekappaleista

Kaikista tutkittavista vyyhdeistä mitattiin resistanssi. Kuten yhtälöstä 4 nähdään, resistanssi on riippuvainen johtimen pituudesta. Tällöin lämpölaajenemisen vaikutuksesta johtimen resistanssi on riippuvainen myös ympäristön lämpötilasta. Resistanssit mitattiin HIOKI RM3548-resistanssimittarilla, johon voitiin liittää lämpötila-anturi. Tällöin voidaan käyttää mittarin lämpötilankompensointitoimintoa, joka korjaa resistanssin automaattisesti mittausten aikana. Resistanssin lämpötilareferenssinä käytettiin 20 °C astetta, joka on IEC-standardeissa määritetty referenssilämpötila (IEC 60228 2004: 8–9). Alkutilan resistanssit on koottu taulukkoon 5.

Taulukko 5. Koekappaleiden tyypit, alkutilan mitatut resistanssit ja käytetyt tunnukset.

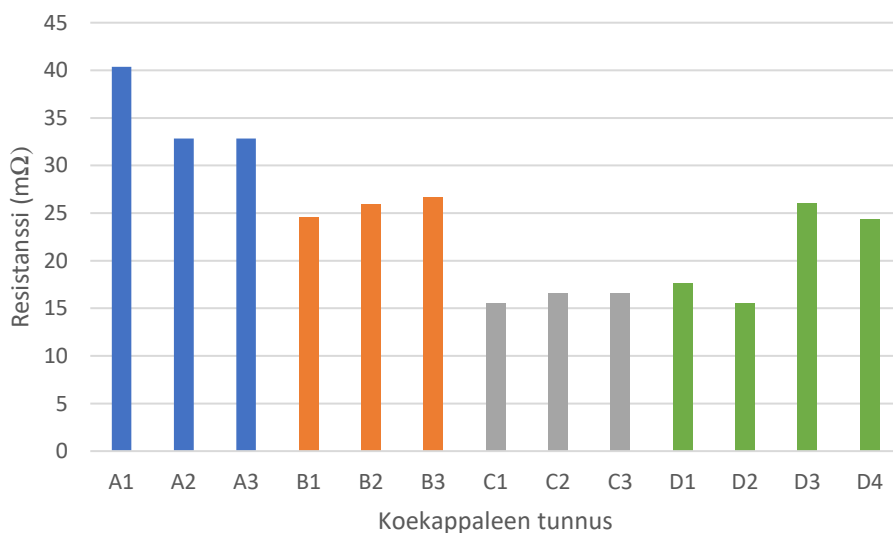
Lanka	Koko	Kenkä	Resistanssi (mΩ)	Tunnus
Cu	4 mm ²	ABB	40,57	A1.1
Cu	4 mm ²	ABB	40,78	A1.2
Al	4 mm ²	ABB	33,29	A2.1
Al	4 mm ²	ABB	32,59	A2.2
Al	4 mm ²	TE Connectivity	33,3	A3.1
Al	4 mm ²	TE Connectivity	32,98	A3.2
Cu	10 mm ²	ABB	24,73	B1.1
Cu	10 mm ²	ABB	24,73	A1.2
Al	10 mm ²	ABB	26,16	B2.1
Al	10 mm ²	ABB	26,23	B2.2
Al	10 mm ²	Klauke	26,19	B3.1
Al	10 mm ²	Klauke	26,05	B3.2
Cu	16 mm ²	ABB	15,71	C1.1
Cu	16 mm ²	ABB	15,73	C1.2
Al	16 mm ²	ABB	16,65	C2.1
Al	16 mm ²	ABB	16,55	C2.2
Al	16 mm ²	Klauke	16,59	C3.1
Al	16 mm ²	Klauke	16,67	C3.2
Al	16 mm ²	Ouneva jatkoh.	17,79	D1.1
Al	16 mm ²	Ouneva jatkoh.	17,86	D1.2
Cu	16 mm ²	ABB jatkoholkki	15,69	D2.1
Cu	16 mm ²	ABB jatkoholkki	15,69	D2.2
Al	10 mm ²	Klauke jatkoh.	26,45	D3.1
Al	10 mm ²	Klauke jatkoh.	26,44	D3.2
Cu	10 mm ²	ABB jatkoholkki	24,79	D4.1
Cu	10 mm ²	ABB jatkoholkki	24,72	D4.2

Resistanssimittauksista koostettiin kuvassa 20 näkyvä kaavio. Kuvassa vaaka-akselilla on esitetty koekappaleen tunnus A-D, joka kuvaa eri kokoluokkia. A-sarjana on merkitty 4 mm², B-sarjana 10 mm² ja C-sarjana 16 mm² kokoluokan kaapelikengät. D-sarjana on merkitty jatkoholkit.



Kuva 20. Vyyhtien resistanssin mittauksen tulokset esitettynä pylväsdiaqrammina.

Kuvasta 20 voidaan todeta, että aina kahden samanlaisen koekappaleen resistanssit ovat hyvin lähellä toisiaan, jolloin voidaan todeta, että kaksi identtistä koekappaletta ovat laadullisesti hyviä ja niiden tuloksista voidaan ottaa keskiarvo. Kahden samanlaisten koekappaleiden resistanssien keskiarvot on vielä esitetty kuvassa 21.



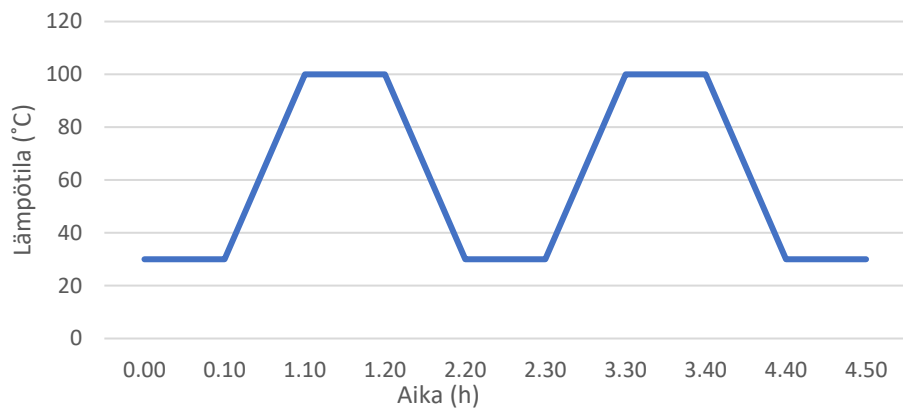
Kuva 21. Koekappaleiden mitattujen resistanssien keskiarvot.

7.1.2 Lämpövanhennus ja resistanssien uudelleen mittaus

Koekappaleet aseteltiin Techobothnian sääkaappiin kuvan 22 mukaisesti. Sääkaappiin asetettiin lämpövanhennusmalliksi alaluvun 7.2 alussa kuvattu lämmitys ja jäähdytys-sykli. Kuvassa 23 on kuvattu visuaalisesti kaksi lämmitys- ja jäähdytys-sykliä. Sääkaapin lämmitys- ja jäähdytyskapasiteetilla lämpötilan nostaminen ja laskeminen haluttuihin arvoihin kestää yhden tunnin. Pitoaika on 10 minuuttia, jolloin yhteen lämmitys- ja jäähdytys-sykliin kuluu aikaa 2 h 20 min. Pitkän lämmitys- ja jäähdytys-syklin vuoksi kokonaissyklimäärää päätettiin laskea 128 sykliin. Kokonaissyklien määrä jaettiin kahteen osaan ja jokaisen syklistarjan jälkeen suoritettiin resistanssien mittaus.

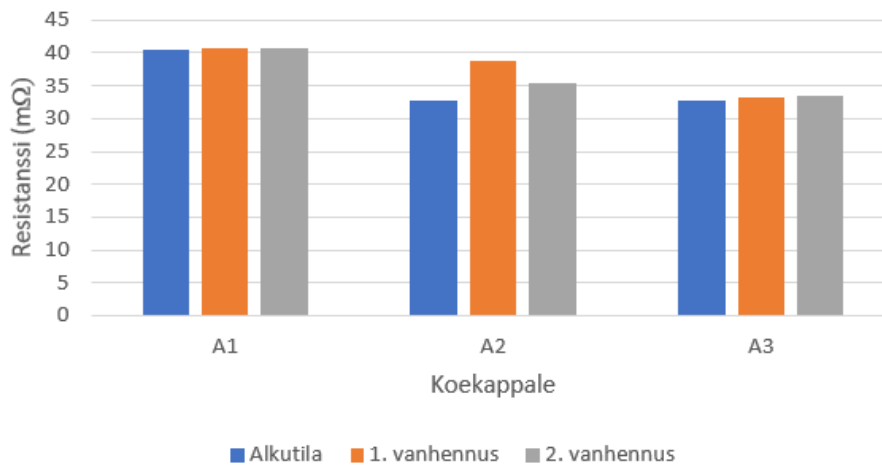


Kuva 22. Koekappaleet aseteltuna sääkaappiin.



Kuva 23. Lämpövanhennuskokeen syklimalli. Kuvassa kaksi sykliä. Yhden syklin aika 2:20 h.

Kuvassa 24 on esitetty 4 mm² kokoluokan vyyhtien resistanssimittaukset ensimmäisen 64 vanhennussyklin jälkeen sekä vanhennuksen lopun eli 128 vanhennussyklin jälkeen.

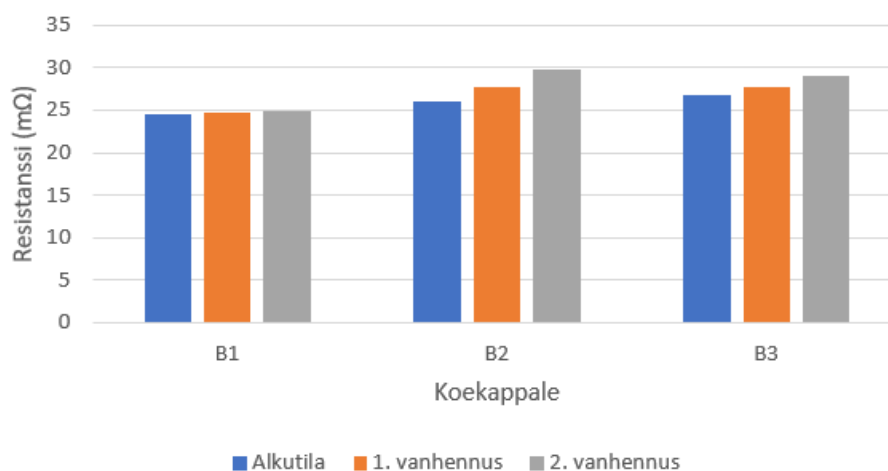


Kuva 24. 4 mm² kokoluokan vyyhtien resistanssimittaukset ensimmäisen ja toisen vanhennussyklisarjan jälkeen. A1 on kuparilanka omilla kaapelikengillä, A2 on alumiinilanka omilla kaapelikengillä ja A3 on alumiinilanka TE Connectivityn alumiinijohtimelle tarkoitetuilla kaapelikengillä.

Kuvasta 24 voidaan havaita, että tuotannossa kuparilangan kanssa käytettävien kaapelikenttien resistanssi pysyy vanhennuksen jälkeen suurin piirtein samana. Tuotannossa käytettävien kaapelikenttien käyttö alumiinilangan kanssa saa vyyhdin resistanssin nousemaan, mutta toisen vanhennuksen jälkeen resistanssi pienenee hieman. Selvästi muihin

koekappaliin nähden suuret resistanssin muutokset kertovat selvästi liitoksen huonontuneesta johtavuudesta. TE Connectivityn kaapelikenkien käyttö alumiinilangan kanssa näyttää toimivan melkein yhtä hyvin kuin tuotannossa käytettävien kaapelikenkien käyttö kuparilangan kanssa. Ensimmäisen ja toisen vanhennuksen jälkeen vyyhdin resistanssit eivät nouse kovinkaan paljon, toisin kuin esimerkiksi A2-koekappaleiden resistanssit. Prosentuaalisesti resistanssi nousee A1:lla 1,06 %; A2:lla 8,1 % ja A3:lla 1,79 %. Ulkoisesti vanhennustestin jälkeen ei ole havaittavissa minkäänlaisia merkkejä galvaanisesta tai muista korroosiotyypeistä. A2 koekappaleiden liitoksen heikentyminen voi johtua osittain alumiinilangan päälle muodostuvasta oksidikerroksesta. Toinen selitys on, että liitos pääsee lämpölaajenemisen vaikutuksesta elämään, jonka seurauksena liitos löystyy ja sähkönjohtavuus heikkenee.

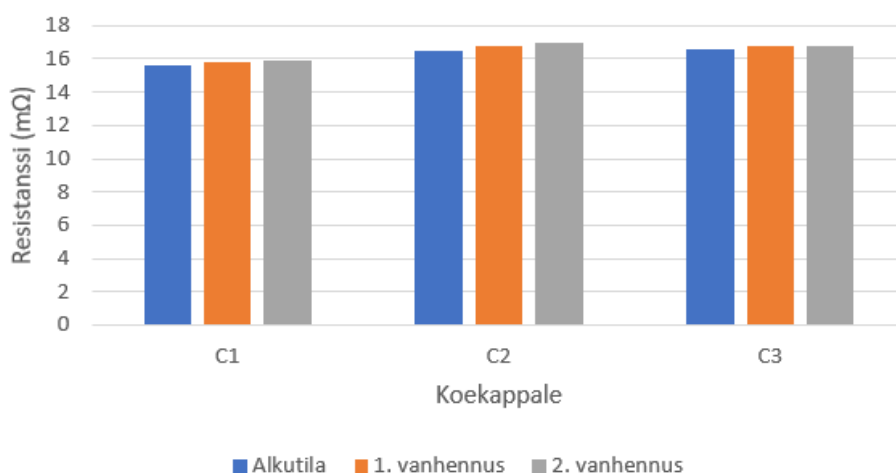
Kuvassa 25 on esitetty 10 mm² kokoluokan kaapelikenkien lämpövanhennuskokeen tulokset.



Kuva 25. 10 mm² kokoluokan kaapelikenkien lämpövanhennuskokeen tulokset. Kuvassa B1 kuvaa tuotannossa käytössä olevia kaapelikenkiä kuparilangan kanssa, B2 on käytetty tuotannossa käytettäviä kaapelikenkiä alumiinilangan kanssa ja B3 on alumiinilangan kanssa käytetty Klauken alumiinijohtimelle soveltuva kaapelikenkä.

Kuvasta 25 on havaittavissa, että B1-koekappaleiden resistanssi pysyy myös tässä kokoluokassa melkein muuttumattomana. B2-koekappaleen resistanssi nousee melko line-

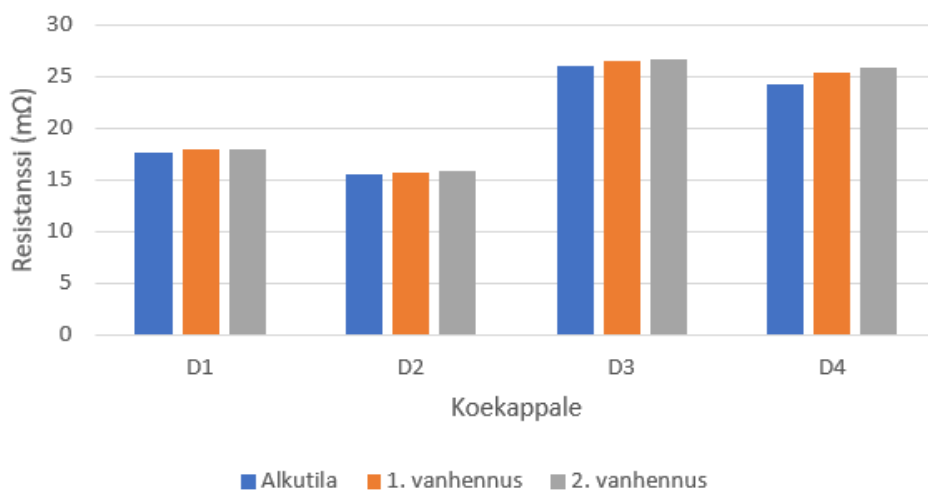
aarisesti. Myös B3-koekappaleiden resistanssi nousee lineaarisesti. Muutos ei ole kuitenkaan yhtä jyrkkä kuin B2-koekappaleiden. Verrattuna alku- ja lopputilan resistansseja saadaan prosentuaaliseksi resistanssin muutokseksi B1:lla 1,06 %, B2:lla 14,83 % ja B3:lla 8,82 %. Näistä siis B2-koekappaleen resistanssi kasvoi selvästi eniten. Huomioitavaa on, että tutkimuksissa alumiiniset kaapelikengät puristettiin vain yhdellä puristuksella. Kuten aiemmin mainittiin, alumiiniset kaapelikengät ovat kooltaan yleensä suurempia verrattuna kuparista valmistettuihin kaapelikenkiin. Tällöin kaapelikenkään voidaan tehdä useampiakin puristuksia, jolloin kontaktipinta kasvaa ja samalla liitoksesta tulee parempi verrattuna siihen, että puristuksia olisi vähemmän. Tässä työssä tutkittavissa kuparisten kaapelikenkien kokoluokassa kaapelikenkään mahtuu vain yksi puristus, jolloin kontaktipintaa ei voida kasvattaa lisäämällä puristusten määrää. Seuraavaksi kuvassa 26 on esitetty 16 mm² kokoluokan kaapelikenkien lämpövanhennuskokeen tulokset.



Kuva 26. 16 mm² kokoluokan kaapelikenkien lämpövanhennuskokeen tulokset. Kuvassa C1 kuvaa tuotannossa käytössä olevia kaapelikenkiä kuparilangan kanssa, C2 on käytetty tuotannossa käytettäviä kaapelikenkiä alumiinilangan kanssa ja C3 on käytetty Klauken alumiinijohtimelle soveltuvaa kaapelikenkiä ja alumiinilankaa.

Kuvasta 26 on havaittavissa hyvin saman tyyliiset tulokset kuin B-sarjan koekappaleista. Kuvasta voidaan havaita, että nyt resistanssit eivät kasva kuitenkaan samalla kulmakerroimella kuin B-sarjan koekappaleiden B2 ja B3. Edelleen tulos on sama eli jos käytetään tuotannossa käytössä olevia kaapelikenkiä alumiinilangan kanssa niin tällöin resistanssin

kasvu on suurempaa verrattuna muihin koekappaleisiin. C-sarjan koekappaleiden prosentuaaliset resistanssin muutokset ovat C1:lla 1,99 %, C2:lla 2,80 % ja C3:lla 1,71 %. Näin ollen prosentuaalisesti C3-koekappaleen resistanssi nousi nyt vähiten. Seuraavaksi kuvassa 27 on esitetty vastaavasti jatkoholkkien lämpövanhennuskokeen tulokset.



Kuva 27. 16 mm² ja 10 mm² kokoluokan jatkoholkkien lämpövanhennuskokeen tulokset. Kuvassa D1 on Ounevan jatkoholkki alumiinilangan kanssa, D2 on tuotannossa käytettävä 16 mm² jatkoholkki kuparilangan kanssa, D3 on Klauken 10 mm² bimetalliholkki kupari- ja alumiinilangalla ja D4 on tuotannossa käytössä oleva 10 mm² jatkoholkki kuparilangan kanssa.

Kuvasta 27 voidaan havaita, että myös 16 mm² jatkoholkkien kohdalla tulokset ovat hyvin saman kaltaisia kuin vastaavan kokoisilla kaapelikengillä. Koekappaleen, jossa käytettiin Ounevan jatkoholkkia, resistanssi nousi alku- ja lopputilan välillä noin 2,1 % ja koekappaleen, jossa käytettiin tuotannossa olevaa jatkoholkkia, resistanssi nousi myös noin 2,1 %. Pienemmässä kokoluokassa koekappaleen, jossa käytettiin Klauken bimetallijatkoholkkia, resistanssi kasvoi noin 2,6 % ja vastaavasti tuotannossa käytössä olevan liitoksen resistanssi kasvoi noin 6,5 %. Näistä tuloksista tuotannossa käytettävä 10 mm² jatkoholkin resistanssin nousu on muista kuparilangallisista koekappaleista selvästi poikkeava, sillä muissa resistanssin nousu on kokoluokasta riippumatta noin 1–2 %. Tämä viittaisi jonkinlaiseen mittausvirheeseen tai sattumalta kahteen laadultaan huonoon koekappaleeseen. Klauken bimetalliholkin resistanssimittauksen tulokset ovat taas huomattavasti paremmat kuin esimerkiksi 10 mm² kokoluokan Klauken kaapelikengällä varustetun koekappaleen resistanssimittaukset. Näin ollen alumiinisten kaapelikengien osalta

voi olla mahdollista, että myös itse kaapelikengän päälle on ehtinyt muodostua oksidikerros, joka vaikuttaa resistanssin mittaukseen. Bimetalliholkissa resistanssi mitattiin holkin kuparisesta päästä, johon ei muodostu samanlaista oksidikerrosta kuin alumiinin päälle.

7.1.3 Lämpövanhennuskokeen tulosten analysointi

Tutkimusten perusteella on havaittavissa, että tuotannossa käytettävä liitos on selkeästi parempi verrattuna alumiinilankaan tehtyihin liitoksiin. Riippumatta kokoluokasta, resistanssin kasvu on tuotannossa käytössä olevissa liitoksissa vähäisin. Tulosten perusteella joka kokoluokassa alumiinilankaan puristetun tuotannossa käytössä oleva kaapelikengän liitoksen resistanssi kasvoi hieman enemmän verrattuna siihen, jos käytössä oli alumiinille suunniteltu kaapelikengä. Tämä antaa viitteitä siitä, että alumiinilangan kanssa, liitosresistanssia ajatellen, on etua käyttää sille suunniteltuja kaapelikengkiä. Lisäksi pitkällä aikavälillä alumiinikaapelikengkiä käytettäessä ei ole riskiä galvaanisesta korroosiosta, koska käytetään samaa materiaalia. Tuloksista voidaan havaita myös, että resistanssin nousu prosentuaalisesti pienenee selvästi 16 mm² kokoluokan koekappaleissa. Silmämääräisesti tarkasteltuna liitokset eivät juurikaan vaikuttaneet muuttuvan lämpövanhennuksen jälkeen. Lukuun ottamatta kuparilangan värin tummumista. Näin ollen ainakaan näin lyhyellä lämpövanhennuksella ei siis ole mahdollista simuloida liitosten korroosiokestävyyttä. Kokeen perusteella taas oksidikerroksen muodostumista alumiinin pintaan voidaan mahdollisesti simuloida, koska oksidikerroksen muodostuminen liitoskohtaan saattaa olla syy alumiinilangallisen koekappaleiden resistanssin nousuun.

Raja-arvoa resistanssin nousulle on hankala määrittää, koska kaapelikengille sääkaapissa tehtävää lämpövanhennuskoea ei ole standardeissa määritelty, mutta esimerkiksi Ronald F. Frankin ja Christopher P. Mortonin tutkimuksessa *Comparative Corrosion and Current Burst Testing of Copper and Aluminum Electrical Power Connector* (Frank & Morton 2007) resistanssin nousun rajaksi korroosio- ja virtatestin jälkeen on asetettu 10 %. Toisena esimerkkinä ABB:n sähkömoottoreiden rutiinitestauksessa vaiheresistanssit saavat poiketa laskennallisesta resistanssista 2 %. Mikäli vertailukohtana käytetään tuotannossa käytössä olevia liitoksia niin noin 2 % resistanssin nousun voidaan ajatella olevan täysin

hyväksyttävä resistanssin nousu. Tutkimusten perusteella valituista kaapelikengistä parhaiten toimivat Klauken 16 mm² kokoluokan kaapelikenkä sekä TE Connectivityn 4 mm² kokoluokan kaapelikenkä. TE Connectivityn kaapelikenkä toimi yllättävän hyvin ja sen resistanssin muutos käyttäytyi hyvin samankaltaisesti kuin tuotannossa käytössä olevat liitokset. Myös Ounevan alumiinijohtimelle suunniteltu jatkoholkki toimi hyvin ja resistanssin muutos käyttäytyi samalla tavalla kuten tuotannossa käytössä olevien kaapelikenkien ja jatkoholkkien resistanssit. Kaikilla edellä mainituilla koekappaleilla resistanssin nousu pysyi vanhennuskokeen jälkeen noin 2 % paikkeilla. 10 mm² kokoluokassa taas molemmat alumiinilangan kanssa käytetyt kaapelikenkien resistanssit nousevat yli 8 %. Tulos poikkeaa selkeästi tuotannossa käytössä olevien liitosten resistanssin noususta.

7.2 Vetokokeet koekappaleille

Vetokoelaitteisto koostuu kahdesta leuasta, joiden väliin tutkittava kappale asetetaan. Koeksessa leuat liikkuvat vertikaalisesti toisistaan poispäin, samalla vetäen tutkittavaa kappaletta. Jossain vaiheessa kappale antaa periksi, jolloin laitteisto mittaa voiman kyseisessä pisteessä. Näin saadaan testattua kappaleen vetolujuus. Kuvassa 28 on esitetty käytettävä vetokoelaitteisto.



Kuva 28. Käytettävä vetokoelaitteisto.

Vetokokeet suoritettiin Helsingin ABB:n laboratoriossa. Kyseisen laboratorion vetokoelaitteistolla on mahdollista myös piirtää esimerkiksi voima venymän funktiona.

Vetokokeen tarkoituksena on vertailla alumiinijohtimelle tarkoitettujen kaapelikenkien eroavaisuuksia jo käytössä oleviin kuparijohtimien kanssa käytettäviin kaapelikenkiin. Vetokokeella testataan nimensä mukaisesti liitoksen vetolujuutta. Kokeita varten valmistettiin kolmesta eri poikkipinta-alan johtomesta kolme erilaista sarjaa: 1) kuparijohdin liitettynä jo käytössä olevaan kupariseen kaapelikenkään, 2) alumiinijohdin liitettynä jo

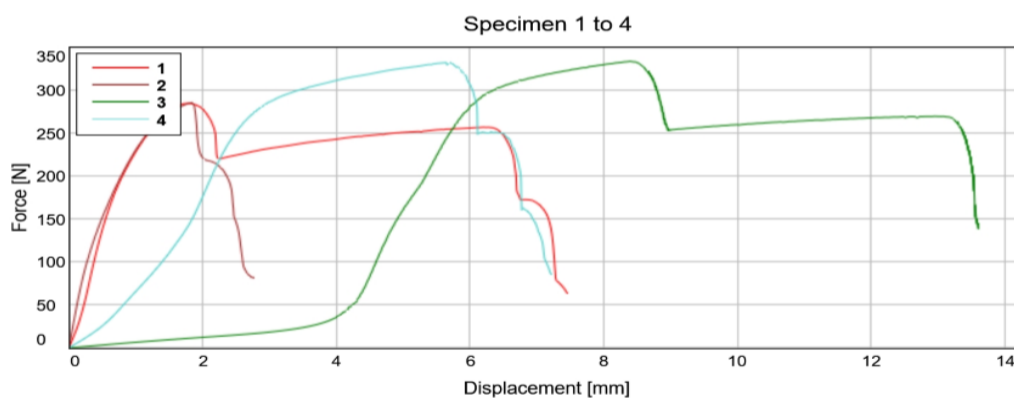
käytössä olevaan kupariseen kaapelikenkään ja 3) alumiinijohdin liitettynä alumiinijohtimelle tarkoitettuun kaapelikenkään. Kustakin sarjasta tehdään 4 erilaista koekappaletta, siten, että yhden noin 15 cm pitkän johtimen kumpaankin päähän puristetaan tutkittava kaapelikenkä. Näin tiedetään, että toinen pää, josta liitos ei pettänyt kestää vähintään yhtä paljon vetoa kuin pää, josta liitos pettää. Tällöin yhdellä vedolla saadaan tulokset kahdesta kaapelikengästä. Vetokoetta varten valmistettavien koekappaleiden valmistukseen käytettiin apuna lämpövanhennuksessa käyneitä vyyhtejä, kaapelikenkiä ja jatkoholkkeja. Jokaisesta kokoluokasta kaksi vetokoekappaletta valmistettiin siten, että kappaleen toiseen päähän jätettiin lämpövanhennuksessa ollut kaapelikenkä tai jatkoholkki. Toiseen päähän puristettiin ns. tuore kaapelikenkä. Tämän tarkoituksena on selvittää, onko lämpövanhennuksessa käyneen kaapelikengän vetolujuus muuttunut vai pysynyt samana. Vertailukohteeksi valmistettiin vielä toiset kaksi tuoretta koekappaletta. Alumiinisten kaapelikenkien osalta ns. tuoret koekappaleet tehtiin siten, että yhteen koekappaleeseen puristettiin vielä useampi puristus valmistajan ohjeiden mukaisesti. Näin voidaan tarkastella useamman puristuksen vaikutusta kaapelikengän vetolujuuteen. Kaapelikenkien lisäksi valmistettiin vetokoekappaleet 16 mm² ja 10 mm² jatkoholkkeja varten. Jatkoholkkien vetokoekappaleita valmistettiin kummastakin kokoluokasta neljä kappaletta kuparilangalla ja tuotannossa käytössä olevilla jatkoholkeilla, sekä neljä kappaletta alumiinilangalla ja alumiinijohtimelle soveltuvilla kaapelikengillä. Yhteensä jatkoholkkien vetokoekappaleita on siis kahdeksan kummastakin kokoluokasta. Jatkoholkkien vetokoekappaleet tehtiin siten, että yhteen holkkiin puristettiin molempiin päihin noin metrin mittaiset johdinpätkät. Tarkoituksena on, että holkki sidotaan vetokoelaitteiston leukoihin. Jatkoholkeista saadaan siis vain yhdellä vedolla tulos yhdestä jatkoholkista. Vastaavasti kuitenkin kaapelikenkien kanssa, myös jatkoholkeissa jätettiin kahteen koekappaleeseen per sarja toiseen päähän holkkia vanha liitos, joka oli jo ollut lämpövanhennuskokeessa.

7.2.1 Koekappaleiden vetokokeiden tulokset

Vetokoelaitteiston asetuksiin asetettiin vetonopeudeksi 10 mm/min. vedoista piirrettiin kuvaajat, joissa on esitetty voima venymän funktiona. Tuloksissa on esitettynä myös lukuarvona vetokoekappaleiden vetolujuus. Tuloksissa on myös esitettynä koekappaleet vetokokeiden jälkeen.

Vetokokeen tulokset, kun käytössä on alumiinilanka ja tuotannossa jo käytössä olevat 4 mm² kaapelikengät

Kuvassa 29 on esitetty 4 mm² koon vetokoekappaleiden tulokset, joissa on käytetty tuotannossa käytettäviä kaapelikenkiä ja alumiinilankaa. Kyseisessä testissä venymän mittaaminen ei ole onnistunut oikein sillä osa koekappaleista eivät olleet riittävästi venytettyjä ennen kuin ne asetettiin vetokoneen leukoihin. Tästä syystä vedot 3 ja 4 näyttävät venymältä suuremmilta kuin vedot 1 ja 2. Kuvassa 30 on esitetty itse vetokoekappaleet vetokoneen jälkeen.



	Maximum Force [kN]	Tensile displacement at Maximum Force [mm]
1	0.29	1.77
2	0.29	1.82
3	0.33	8.41
4	0.33	5.71

Kuva 29. Koon 4 mm² vetokoekappaleiden tulokset, joissa on käytetty omia tuotannossa käytettäviä kaapelikenkiä ja alumiinilankaa.



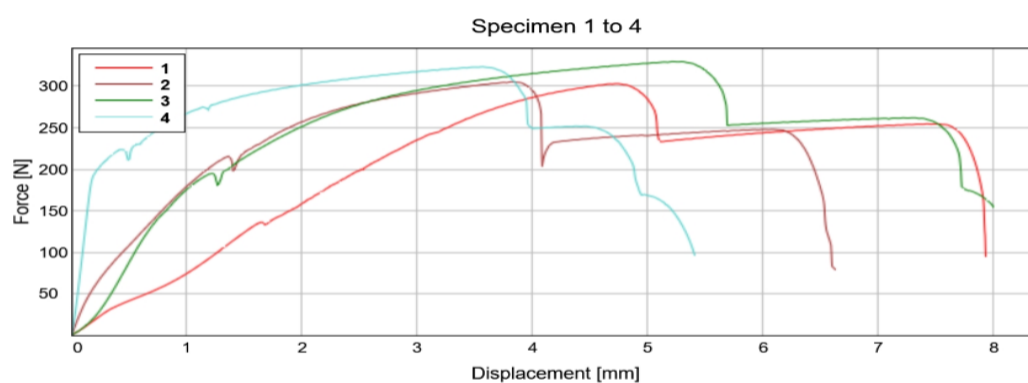
Kuva 30. Tuotannossa käytettävät 4 mm² kaapelikengät alumiinilangan kanssa vetokokeen jälkeen.

Kuvassa 29 vetokokekappaleet 1 ja 2 ovat kappaleita, joissa toinen pää on vanhennettu liitos ja toinen ns. tuore liitos. Kappaleissa 3 ja 4 on kummassakin päässä tuoreet liitokset. Vetokokeen jälkeen voitiin havaita, että yhdessäkään koekappaleessa langat eivät luisahda pois kaapelikengästä vaan yleisin syy vedon pettämiselle oli, että alumiinilanka katkeaa. Kappaleissa 3 ja 4 langat menivät poikki siitä kohtaa, josta emalia on alettu poistamaan. Kappaleissa 1 ja 2 lanka katkesi aivan liitoksen juuresta. Vanhennetun ja tuoreen liitoksen välillä ei näyttänyt olevan eroa sillä lanka katkesi vanhennetun liitoksen päästä toisessa vedossa, mutta toisessa taas vanhennettu liitos kesti paremmin kuin tuore liitos. Vetolujuus kaikilla kappaleilla on noin 300 N ja tuloksissa on vain muutaman Newtonin ero.

Vetokokeen tulokset, kun käytössä on alumiinilanka ja TE Connectivityn 4 mm² kaapelikengät

Seuraavaksi vedettiin TE Connectivityn alumiinijohtimelle suunnitellut kaapelikengät. Näistä tulokset on esitetty kuvassa 31. Siitä voidaan nähdä, että vetolujuudeltaan koekappaleet ovat samaa luokkaa kuin kuvan 29 tuloksissa. Havaittavissa on hieman pienempi hajonta vanhennettujen ja tuoreiden koekappaleiden välillä. Myös tässä vetokoesarjassa

kappaleet 1 ja 2 ovat vanhennettuja koekappaleita ja 3 ja 4 tuoreilla liitoksilla. Myöskään tässä vetokoesarjassa langat eivät luistaneet pois liitoksesta, vaan lanka meni poikki joko aivan liitoksen juuresta tai siitä kohtaa, josta emalia on alettu kuorimaan. Kuvassa 32 on kuvattuna vedetyt kappaleet vetokokeen jälkeen. Tässä vetosarjassa kumpikin liitos petti tuoreen liitoksen päästä.



	Maximum Force [kN]	Tensile displacement at Maximum Force [mm]
1	0.30	4.70
2	0.31	3.84
3	0.33	5.24
4	0.32	3.55

Kuva 31. Vetokokeen tulokset, kun käytössä TE Connectivityn Copalum sarjan 4 mm² koon kaapelikengä ja alumiinilanka.



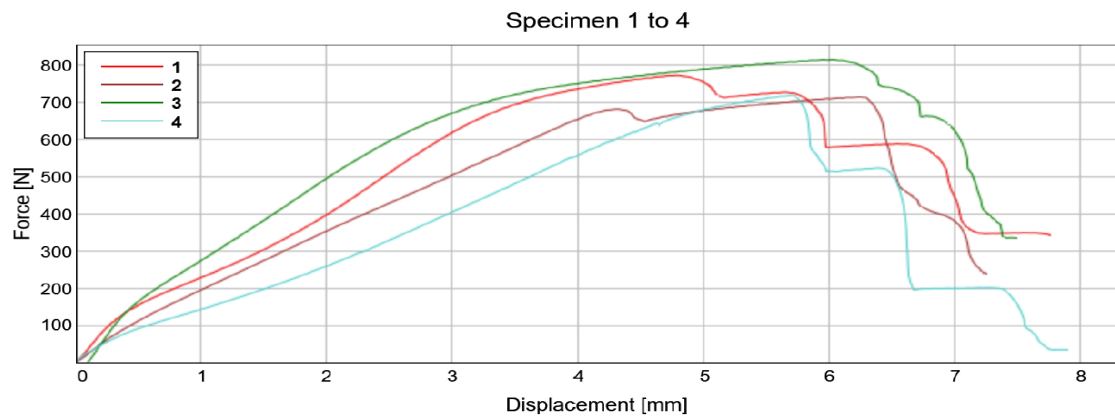
Kuva 32. TE Connectivityn kaapelikengät alumiinilangan kanssa vetokokeen jälkeen.

Vetokokeen tulokset, kun käytössä on kuparilanka ja tuotannossa jo käytössä olevat 4 mm² kaapelikengät

Seuraavaksi vedettiin koekappaleet, joissa käytetään kuparilankaa ja tuotannossa käytettäviä kaapelikenkiä. Kyseisestä vetokokeesta graafinen esitys katosi vetokokeen yhteydessä, eikä sitä saatu enää palautettua. Kokeesta otettiin kuitenkin vetolujuudet ylös vetokokeen aikana, joten lukuarvolliset tulokset ovat esitettävissä. Näistä vanhennettujen kappaleiden vetolujuudet olivat 0,91 kN ja 0,92 kN ja tuoreen liitoksen vetolujuus 0,94 kN. Tiukan aikataulun vuoksi kuparilangallisilla koekappaleilla tehtiin vain 3 vetoa, sillä kaikissa kokoluokissa erot vanhennetun ja tuoreen liitoksen välillä olivat hyvin pienet. Lisäksi kuparilangallisen koekappaleen vetämiseen meni reilusti pidempi aika kuin alumiinilangalliseen koekappaleeseen. Tulokset olivat oletuksen mukaiset eli kuparilangalla, ja tuotannossa käytössä olevilla kaapelikengillä vetolujuus on paljon suurempi kuin alumiinilangalla.

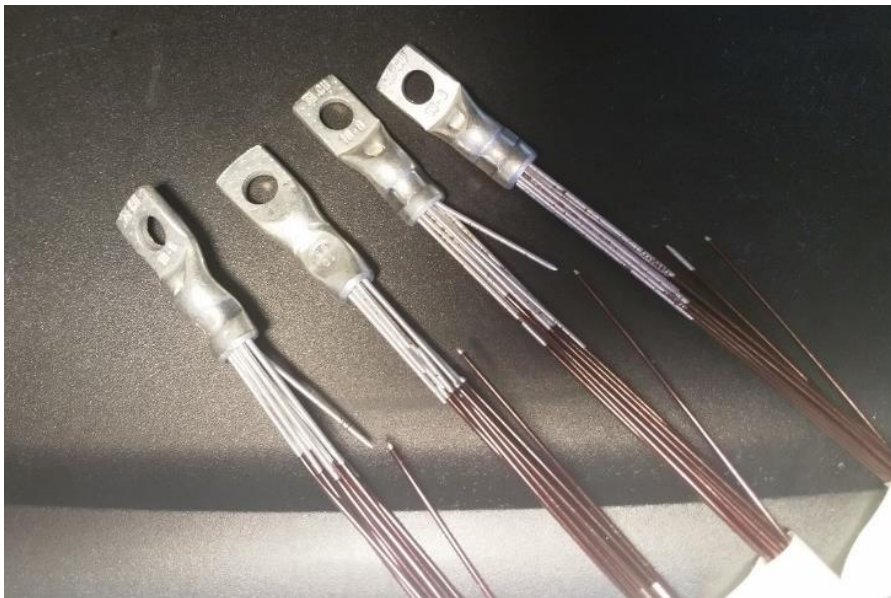
Vetokokeen tulokset, kun käytössä on alumiinilanka ja tuotannossa jo käytössä olevat 10 mm² kaapelikengät

Seuraavaksi vedettiin kokoluokan 10 mm² koekappaleet. Kuvassa 33 on koekappaleiden vetokoetulokset, joissa on käytetty tuotannossa käytettäviä kaapelikenkiä alumiinilangan kanssa ja kuvassa 34 on esitettyä koekappaleet vetokokeen jälkeen.



	Maximum Force [kN]	Tensile displacement at Maximum Force [mm]
1	0.77	4.78
2	0.72	6.26
3	0.82	5.91
4	0.72	5.71

Kuva 33. Vetokoetulokset, kun käytetään tuotannossa käytössä olevia 10 mm² kaapelikenkiä ja alumiinilankaa.

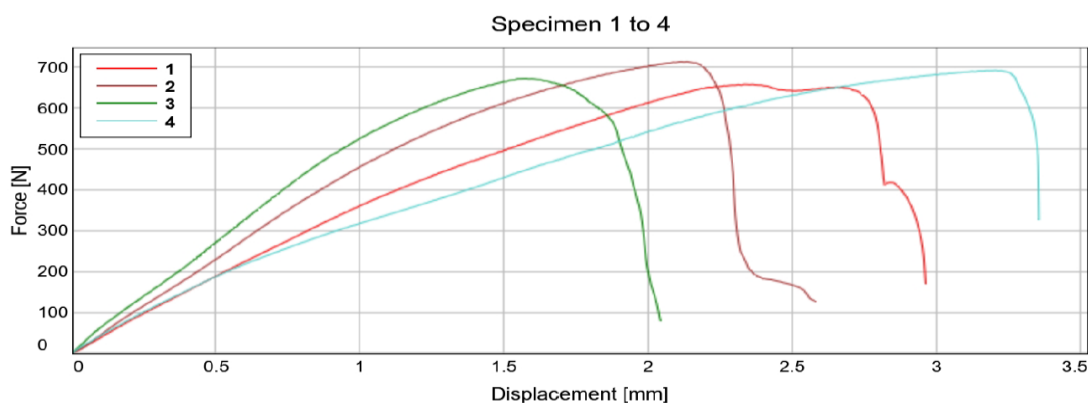


Kuva 34. Tuotannossa käytettävät kaapelikengät alumiinilangan kanssa vetokokeen jälkeen.

Kuten aiemmissakin vedoissa myös kuvassa 33 esitetyissä vedoissa ensimmäiset kaksi vetoa on tehty koekappaleille, joissa toinen pää on ollut lämpövanhennuksessa. Toiset kaksi vetoa on tehty koekappaleille, joissa kummassakin päässä on tuoret liitokset. Tuloksista voidaan havaita, että vetolujuuksien välillä on hieman hajontaa verrattuna esimerkiksi pienemmän kokoluokan vetokoetuloksiin. Keskiarvo vetolujuuksissa on noin 0,76 kN. Kuvasta 34 voidaan havaita, että kaikissa koekappaleissa lanka on katkennut siitä kohtaa, josta emalia on alettu kuoria. Näissä vedoissa yhdessäkään lanka ei katkennut liitoksen juuresta. Lisäksi tuloksista havaitaan, että vanhennettujen koekappaleiden kohdalla liitos petti tuoreen liitoksen puolelta molemmissa vedoissa.

Vetokokeen tulokset, kun käytössä on alumiinilanka ja Klauken alumiinijohtimelle tarkoitettut 10 mm² kaapelikengät

Tämän jälkeen vedettiin koekappaleet, joissa käytettiin alumiinijohtimelle tarkoitettuja kaapelikenkiä ja alumiinilankaa. Kuvassa 35 on esitetty kuvaaja ja taulukko vetokokeen tuloksista.



	Maximum Force [kN]	Tensile displacement at Maximum Force [mm]
1	0.66	2.35
2	0.71	2.12
3	0.67	1.56
4	0.69	3.21

Kuva 35. Vetokoetulokset, kun käytetään Klauken alumiinijohtimelle tarkoitettuja 10 mm² kaapelikenkiä ja alumiinilankaa.

Kuvassa 35 vedot 1–4 on tehty kuten aiemmin. Poikkeuksena, että neljäs veto on koekappaleesta, johon puristettiin useampi puristus. Kuvasta voidaan havaita, että tuloksissa on hieman vähemmän hajontaa verrattuna edelliseen vetokokeeseen. Keskiarvo vetolujuuksissa tässä on noin 0,68 kN. Huomioitavaa on, että vetolujuus jää keskiarvillisesti 80 N pienemmäksi verrattuna siihen, jos käytetään tuotannossa käytettäviä kaapelikenkiä. Lisäksi mielenkiintoisena havaintona voidaan nähdä, että puristuskertojen määrällä ei näytä olevan vaikutusta vetolujuuteen. Kuvasta 36 voidaan nähdä koekappaleet ketokokeen jälkeen.

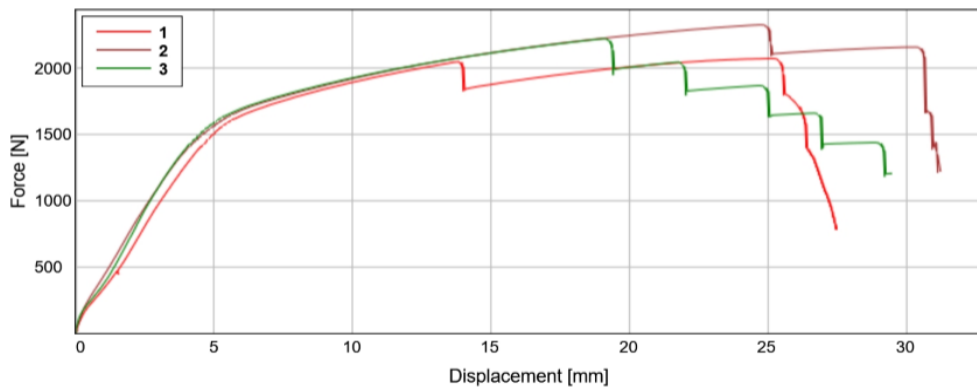


Kuva 36. Klauken 10 mm² alumiinijohtimelle tarkoitetut kaapelikengät vetokokeen jälkeen.

Kuvasta 36 voidaan havaita, että kaikissa koekappaleissa liitos pettää aivan puristuskohdan juuresta. Myös näissä vedoissa lämpövanhennuksessa käyneet liitokset kestivät tuoreita liitoksia paremmin. Tässä vaiheessa voidaan tehdä oletamus, että käytettävä puristin saattaa puristaa kaapelikenkää ja lankaa liikaa, jolloin alumiinilanka pääsee litistymään liikaa. Tällöin luonnollisesti johtimen kokonaispinta-ala pienenee ja vetolujuus heikkenee.

Vetokokeen tulokset, kun käytössä on kuparilanka ja tuotannossa jo käytössä olevat 10 mm^2 kaapelikengät

Seuraavaksi vuorossa olivat samasta kokoluokasta tuotannossa käytettävät kaapelikengät kuparilangan kanssa. Vetokokeen tulos on esitetty kuvassa 37 ja itse koekappaleet vetokokeen jälkeen on esitetty kuvassa 38.



	Maximum Force [kN]	Tensile displacement at Maximum Force [mm]
1	2.08	25.10
2	2.33	24.75
3	2.23	19.12

Kuva 37. Vetokoetulokset, kun käytetään tuotannossa käytössä olevia 10 mm^2 kaapelikenkiä ja kuparilankaa.

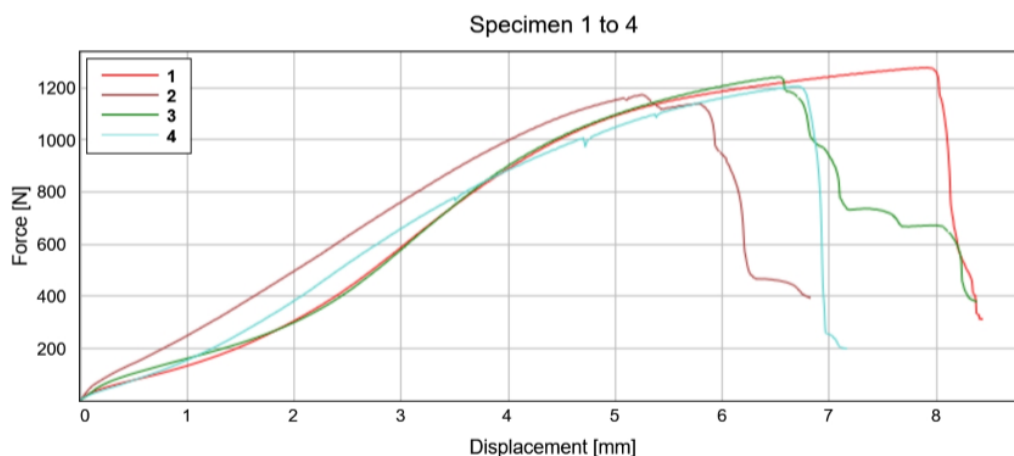


Kuva 38. Tuotannossa käytettävät 10 mm^2 kaapelikengät kuparilangan kanssa vetokokeen jälkeen.

Kuten aiemmin todettiin, kuparilangan kanssa tehtiin ajan säästämiseksi vain kolme vetoa. Tässä vedettiin myös kaksi koekappaletta, joissa toisessa päässä kappaletta oli lämpövanhennuksessa käyneet liitokset. Kolmas vedettävä kappale oli tuoreilla liitoksilla. Kuvasta 37 voidaan nähdä, että odotettavasti vetolujuus on suurempi kuin vastaavat liitokset alumiinilangalla. Toinen ja kolmas koekappale ovat vetolujuudeltaan melko samanlaisia, mutta ensimmäisessä vedossa on hieman suurempi ero verrattuna näihin. Keskiarvona vetolujuudeksi saadaan noin 2,21 kN. Kuvasta 38 voidaan havaita saman kaltaiset tulokset kuin vastaavassa liitoksessa alumiinilangan kanssa. Myös tässä tapauksessa lanka katkeaa aiemmin kuin liitos pettää. Lanka katkeaa tässäkin useimmin kohdasta, josta emalia on alettu kuorimaan. Kuparilangan kanssa voidaan myös havaita, että myös itse kaapelikenkä lähtee venymään voimakkaammin kuin alumiinilangan kanssa.

Vetokokeen tulokset, kun käytössä on alumiinilanka ja tuotannossa jo käytössä olevat 16 mm² kaapelikengät

Seuraavaksi tehtiin vastaavat vedot kuin aiemmin, mutta 16 mm² kokoluokan koekappaleille. Kuvasta 39 voidaan nähdä vetokoetulokset, kun käytetään tuotannossa käytettäviä 16 mm² kaapelikenkiä ja alumiinilankaa. Vetokoekappaleet on tehty samalla lailla ja vedetty samassa järjestyksessä kuten aiemmissa vedoissa.



	Maximum Force [kN]	Tensile displacement at Maximum Force [mm]
1	1.28	7.90
2	1.17	5.26
3	1.24	6.53
4	1.21	6.69

Kuva 39. Vetokoetulokset, kun käytetään tuotannossa käytössä olevia 16 mm^2 kaapelikenkiä ja alumiinilankaa.

Kuvasta 39 voidaan havaita, että tulokset eivät hirveästi eroa toisistaan ja hajontaa on suhteellisen vähän. Vetolujuuden keskiarvo on näiden koekappaleiden kesken noin $1,23 \text{ kN}$. Kuvasta 40 nähdään koekappaleet vetokokeen jälkeen.

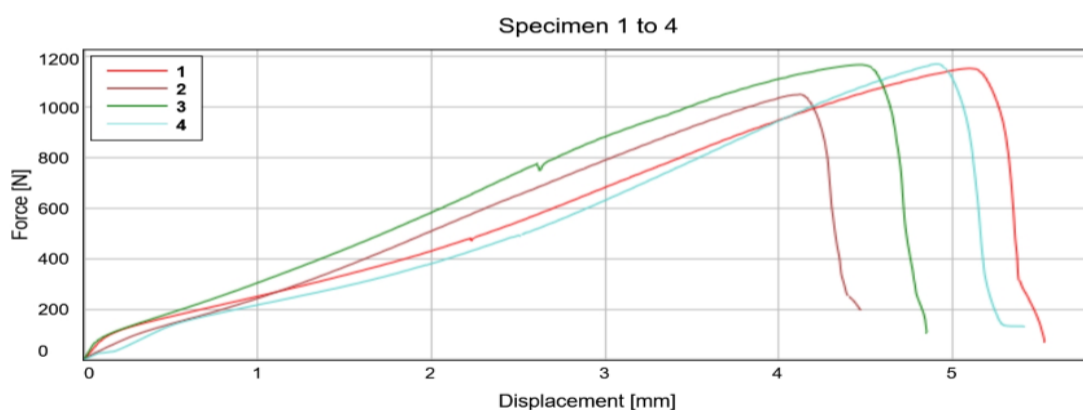


Kuva 40. Tuotannossa käytettävät 16 mm^2 kaapelikengät alumiinilangan kanssa vetokokeen jälkeen.

Kuvasta 40 nähdään, että jokaisessa koekappaleessa lanka on katkennut puristuksen juuresta samalla lailla. Tässä vetokokeessa toinen vanhennetuista liitoksista oli heikompi kuin tuore liitos. Tämä näkyy myös poikkeamana kuvassa 39, jossa toinen veto on hieman muita heikompi.

Vetokokeen tulokset, kun käytössä on alumiinilanka ja Klauken alumiinijohtimelle tarkoitettut 16 mm² kaapelikengät

Seuraavaksi vedettiin Klauken 16 mm² kokoluokan alumiinijohtimelle tarkoitettut kaapelikengät. Tulokset on esitetty kuvassa 41. Koekappaleet vetokokeen jälkeen on esitetty kuvassa 42.



	Maximum Force [kN]	Tensile displacement at Maximum Force [mm]
1	1.15	5.10
2	1.05	4.12
3	1.17	4.48
4	1.17	4.92

Kuva 41. Vetokoetulokset, kun käytetään Klauken alumiinijohtimelle tarkoitettuja 16 mm² kaapelikenkiä ja alumiinilankaa.

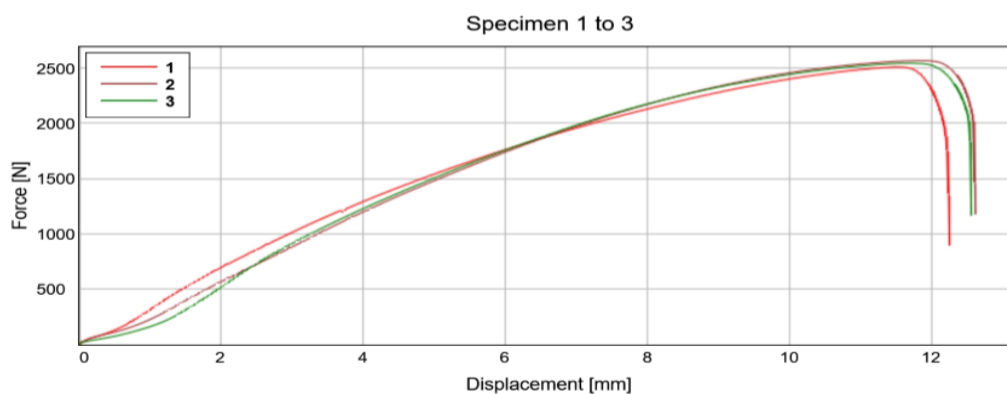


Kuva 42. Klauken 16 mm² alumiinijohtimelle tarkoitetut kaapelikengät vetokokeen jälkeen.

Kuvasta 41 voidaan havaita samantyylliset tulokset kuin 10 mm² kokoluokassa. Tässäkin alumiinijohtimelle tarkoitettujen kaapelikengien vetolujuus jää hieman pienemmäksi verrattuna siihen, jos käytetään tuotannossa käytettäviä kaapelikengiä. Koekappaleiden 1, 3 ja 4 vetolujuudet ovat melkein pä samat, mutta koekappaleessa 2 on hieman poikkeava tulos. Keskiarvoksi koekappaleiden vetolujuudeksi saadaan noin 1,14 kN. Kuvasta 42 voidaan havaita, että näissäkin vedoissa lanka katkeaa aivan puristuksen juuresta. Tässäkin tapauksessa useampi puristus ei vaikuta nähtävästi lainkaan vetolujuuteen tai siihen, mistä kohtaa liitos peittää vaan liitos käyttäytyy samalla lailla kuin kaapelikengät, joissa on vain yksi puristus.

Vetokokeen tulokset, kun käytössä on kuparilanka ja tuotannossa jo käytössä olevat 16 mm² kaapelikengät

Seuraavaksi vedettiin tuotannossa käytössä olevat kaapelikengät kuparilangan kanssa. Vetokokeen tulokset on esitetty kuvassa 43.



	Maximum Force [kN]	Tensile displacement at Maximum Force [mm]
1	2.51	11.50
2	2.57	11.86
3	2.55	11.66

Kuva 43. Vetokoetulokset, kun käytetään tuotannossa käytössä olevia 16 mm² kaapelikenkiä ja kuparilankaa.

Kuvasta 43 voidaan havaita, että verrattuna muihin vetokokeisiin, tässä vetokokeessa hajonta on suhteellisesti vähäisintä. Tulokset ovat odotetusti paremmat kuin alumiinilangan kanssa. Keskiarvo vetolujuudessa koekappaleiden välillä on noin 2,54 kN. Kuvassa 44 on esitetty koekappaleet vetokokeen jälkeen.

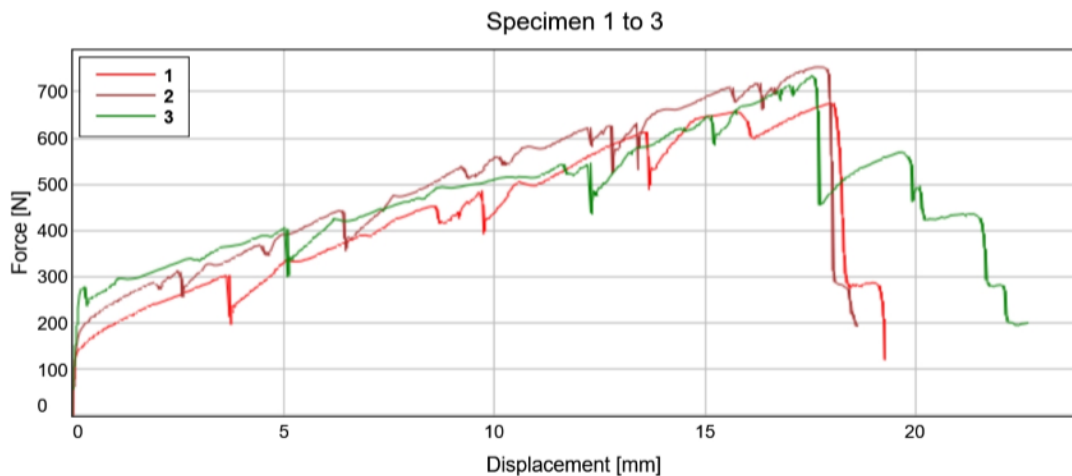


Kuva 44. Tuotannossa käytettävät 16 mm² kaapelikengät kuparilangan kanssa vetokokeen jälkeen.

Muista vetokokeista poiketen, näissä vedoissa langat eivät menneet poikki. Langat eivät myöskään luistaneet kaapelikengästä pois vaan itse kaapelikengä petti. Kuten kuvasta 44 voidaan huomata, että kaapelikengät ovat selvästi venyneet, ja että kaapelikengät ovat murtuneet pultinreiän kohdalta.

Vetokokeen tulokset eri jatkoholkeille

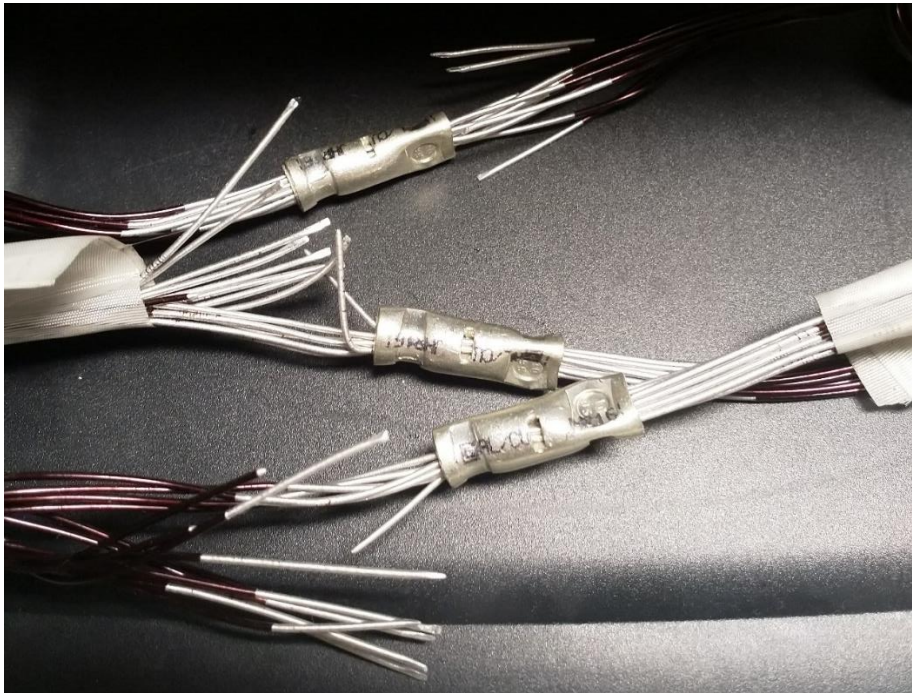
Viimeiseksi vedettiin erilaiset jatkoholkit. Klauken 10 mm² kokoluokan bimetallijatkoholkit osoittautuivat erittäin hankalaksi vetää ja tulokset jäivät epäluotettaviksi. Mittaus-
ten perusteella vetolujuus jäi verrattaen hyvin pieneksi noin 0,22 kN suuruiseksi. Lisäksi itse koekappaleessa ei näkynyt mitään merkkejä lankojen katkeamisesta tai holkin murtumisesta. Tästä syystä päädyttiin suoraan vetämään 16 mm² kokoluokan jatkoholkit. Aluksi vedettiin Ounevan 16 mm² kokoluokan jatkoholkit, jonka molempiin päihin oli puristettu alumiinilangat. Kuten aiemmin mainittiin, Ounevan jatkoholkit on rasteriverkon vuoksi tuotannossa käytettävää jatkoholkkia selvästi suppeampi. Tämän vuoksi puristusvaiheessa ongelmaksi muodostui, että holkin sisään ei ollut mahdollista saada kaikkia 16 lankaa, joka taas onnistui tuotannossa käytettävän jatkoholkin kanssa täysin vaivattomasti. Lämpövanhennuskoetta varten Ounevan jatkoholkkiin saatiin 15 lankaa, mutta vetokoekappaleita valmistettaessa myös 15 langan mahduttaminen holkkiin koitui erittäin hankalaksi. Tästä syystä vetokoekappaleissa Ounevan jatkoholkin kanssa on käytetty 14 alumiinilankaa. Tulokset vetokokeesta on esitetty kuvassa 45.



	Maximum Force [kN]	Tensile displacement at Maximum Force [mm]
1	0.68	18.05
2	0.75	17.71
3	0.73	17.63

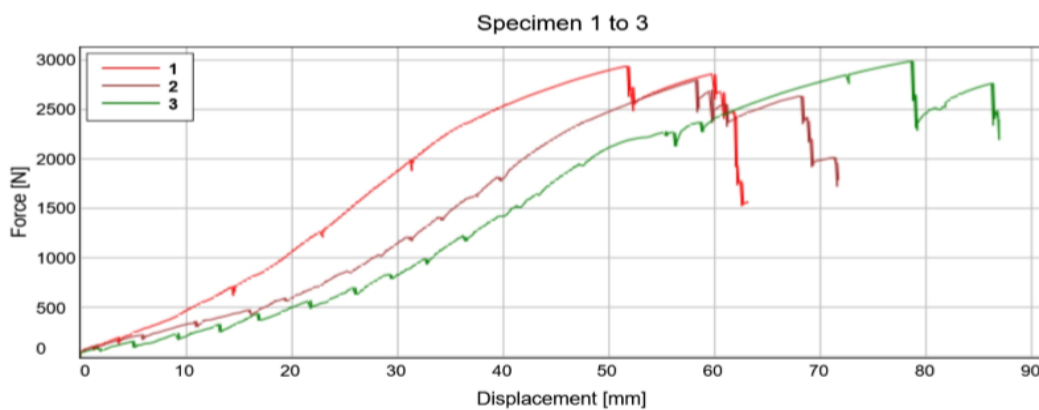
Kuva 45. Vetokoetulokset, kun käytetään Ounevan 16 mm² Al/Cu jatkoholkkia ja alumiinilankaa.

Jatkoholkkien vetokoekappaleet toteutettiin aiemmin mainitulla tavalla siten, että holkin molempiin päihin puristettiin noin metrin mittaiset pätkät lankoja. Näistä pätkistä holkki saatiin sidottua vetokoelaitteistoon niin, että sitä voitiin vetää. Sidonta näkyy kuvassa 45 siten että veto ei ole aivan tasaista vaan sidos kiristyy pieninä nykäyksinä. Lopussa sidos on kiristynyt niin, että liitos pettää. Tässä tapauksessa suurin osa langoista katkesi holkin puristuksen juuresta. Kuvasta 45 voidaan havaita, että vaikka lankoja oli 14 niin vetolujuus jää samalle tasolle kuin 10 mm² kokoluokan alumiinilangallisissa vetokoekappaleissa. Myös tässä tapauksessa voi olla mahdollista, että käytettävä puristin puristaa alumiini lankoja liian voimakkaasti, jolloin langat litistyvät liikaa. Kuvassa 46 on esitetty vedetyt koekappaleet.



Kuva 46. Ounevan 16 mm^2 alumiini- ja kuparilangalle tarkoitetut jatkoholkit alumiinilangan kanssa vetokokeen jälkeen.

Lopuksi vedettiin vielä tuotannossa käytettävät jatkoholkit kuparilangan kanssa. Tämän vetokokeen tulokset on esitetty kuvassa 47.



	Maximum Force [kN]	Tensile displacement at Maximum Force [mm]
1	2.94	51.84
2	2.80	58.38
3	2.99	78.67

Kuva 47. Vetokoetulokset, kun käytetään tuotannossa käytössä olevia 16 mm^2 jatkoholkkeja ja kuparilankaa.

Verrattuna 16 mm² kokoluokan tuotannossa käytettäviin kaapelikenkiin niin kuvan 47 perusteella voidaan havaita, että vetolujuus on suurempi. Keskiarvoksi vetolujuudelle saadaan 2,91 kN. Muista vedoista poiketen, näissä vedoissa lanka ei katkennut emalin kuorintakohdasta eikä myöskään puristuksen juuresta. Näissä vedoissa langat katkesivat sidos kohdasta. Suurin voima kohdistui siis sidoskohtaan, joten itse holkin vetolujuus on oletettavasti vielä suurempi kuin mitä nyt testattiin.

7.2.2 Koekappaleiden vetokoetulosten analysointi

Yhteenvetona vetokokeista voidaan havaita, että kaikissa koekappaleissa itse liitos ei pettänyt, vaan koekappale petti jostakin muusta kohtaa. Suurimmassa osassa koekappaleita lanka katkesi emalin kuorintakohdasta. Näin ollen voidaan todeta, että kupari ja alumiinilangan fyysiset ominaisuudet rajoittavat vetolujuutta enemmän kuin itse liitos. Lähes kaikissa koekappaleissa, joissa lanka katkeaa ensimmäisenä niin alumiinilangallisten koekappaleiden vetolujuus on noin kolmasosa kuparilangallisten koekappaleiden vetolujuudesta. Taulukossa 1 esitetty alumiinin vetolujuus on noin puolet kuparin vetolujuudesta. Ero käytännön ja teorian välillä johtuu todennäköisesti siitä, että taulukon vetolujuudet pätevät puhtaille aineille. Käytettävä alumiinilanka ei ole puhdasta alumiinia, vaan sitä on seostettu eri metalleilla. Näin ollen kolmasosa kuparin vetolujuudesta tuntuu loogiselta erotta.

Alumiinisten kaapelikenkien kohdalla havaittiin hieman pienempiä vetolujuuksia verrattuna tuotannossa käytettäviin kaapelikenkiin alumiinilangan kanssa. Murtumakohdan ja lankojen ulkonäön perusteella voi olla todennäköistä, että käytettävä puristin puristaa alumiinisen kaapelikengän ja alumiinilangat liian voimakkaasti, jolloin alumiinilangat litistyvät liikaa ja näin ollen vetolujuus heikkenee. Erot ovat kuitenkin suhteellisen pieniä. Pienimmässä kokoluokassa alumiinilangan kanssa käytettyjen TE Connectivityn ja tuotannossa käytössä olevien kaapelikenkien välillä ei vaikuttanut olevan eroa. Jatkoholkien kohdalla 16 mm² koon tuotannossa käytettävän jatkoholkin vetolujuus osoittautui saman kokoluokan kaapelikenkää paremmaksi, koska kaapelikenkä petti pultinreiän kohdalta. Jatkoholkin kanssa liitos ei pettänyt missään vaiheessa vaan langat katkesivat ensimmäisenä. Ounevan 16 mm² koon alumiinijohtimelle tarkoitettu jatkoholkin vetolujuus

jäi lankojen määrään nähden hieman pienemmäksi kuin muut tulokset olisivat antaneet odottaa. Vetokokeista, joissa käytettiin alumiinilankaa, voidaan laskea vetolujuus lankaa kohden. Keskiarvoksi vetolujuudelle per lanka saadaan noin 0,072 kN. Tällöin Ounevan jatkoholkin vetolujuus tulisi muiden tulosten perusteella olla noin 1 kN paikkeilla. Myös Ounevan jatkoholkin tilanteessa liiallinen puristus voi olla todennäköinen syy hieman oletettua pienemmälle vetolujuudelle. Loppuanalyysinä voidaan kuitenkin todeta, että kaikki liitokset täyttävät reilusti aiemmin luvussa 6 esitettyjen standardien vetolujuusvaatimukset, joten yleisesti vetolujuudeltaan kaikki liitokset ja koekappaleet ovat erittäin hyviä ja toimivia. Taulukkoon 6 on kerätty kaikki vetokokeiden tulokset.

Taulukko 6. Vetokokeiden tulokset (Klauken bimetalliholkkien tuoloksia ei ole listattu)

Lanka	koko (mm ²)	kenkä	Vetolujuus (kN)	Kommentit
Cu	4	ABB	0,91	Vanhennettu liitos
Cu	4	ABB	0,92	Vanhennettu liitos
Cu	4	ABB	0,94	
Al	4	ABB	0,29	Vanhennettu liitos
Al	4	ABB	0,29	Vanhennettu liitos
Al	4	ABB	0,33	
Al	4	ABB	0,33	
Al	4	TE Connectivity	0,3	Vanhennettu liitos
Al	4	TE Connectivity	0,31	Vanhennettu liitos
Al	4	TE Connectivity	0,33	
Al	4	TE Connectivity	0,32	
Cu	10	ABB	2,08	Vanhennettu liitos
Cu	10	ABB	2,33	Vanhennettu liitos
Cu	10	ABB	2,23	
Al	10	ABB	0,77	Vanhennettu liitos
Al	10	ABB	0,72	Vanhennettu liitos
Al	10	ABB	0,82	
Al	10	ABB	0,72	
Al	10	Klauke	0,66	Vanhennettu liitos
Al	10	Klauke	0,71	Vanhennettu liitos
Al	10	Klauke	0,67	
Al	10	Klauke	0,69	Neljä puristusta
Cu	16	ABB	2,51	Vanhennettu liitos
Cu	16	ABB	2,57	Vanhennettu liitos
Cu	16	ABB	2,55	
Al	16	ABB	1,28	Vanhennettu liitos
Al	16	ABB	1,17	Vanhennettu liitos
Al	16	ABB	1,24	
Al	16	ABB	1,21	
Al	16	Klauke	1,15	Vanhennettu liitos
Al	16	Klauke	1,05	Vanhennettu liitos
Al	16	Klauke	1,17	
Al	16	Klauke	1,17	Neljä puristusta
Cu	16	ABB jatko	2,94	Vanhennettu liitos
Cu	16	ABB jatko	2,8	Vanhennettu liitos
Cu	16	ABB jatko	2,99	
Al	16	Ouneva jatko	0,68	Vanhennettu liitos
Al	16	Ouneva jatko	0,75	Vanhennettu liitos
Al	16	Ouneva jatko	0,73	

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä tarkoituksena on etsiä alumiinikääminällä toteutetun oikosulkumoottorin sähköisiin liitoksiin kaapelikenkiä ja jatkoholkkeja, joita voitaisiin turvallisesti ja luotettavasti käyttää alumiinikäämin liitoksissa. Pääpaino liitoksissa on käämin päihin tulevien kaapelikenkien liitoksissa. Kaapelikenkien lisäksi työssä tutkittiin staattorikäämityksessä käytettäviä jatkoholkkeja. Aluksi työn teoriaosiossa esitetään oikosulkumoottorin perusrakenne ja toiminta. Tämän jälkeen esitetään alumiinin ja kuparin eroavaisuuksia, jonka jälkeen esitetään erilaisia korroosioilmiöitä. Teoriaosiossa lopuksi esitellään erilaisia kaapelikenkiä, jatkoholkkeja ja liitosmenetelmiä sekä tarkastellaan erilaisia standardivaatimuksia kaapelikenkien liitoksille.

Tämän jälkeen siirrytään testausvaiheeseen. Työssä valittiin tutkittavaksi erilaisia kaapelikenkiä ja jatkoholkkeja, jotka ovat suunniteltu käytettäväksi alumiinijohtimien kanssa. Tutkittavat kaapelikengät ovat kooltaan 4 mm^2 , 10 mm^2 ja 16 mm^2 . 10 mm^2 ja 16 mm^2 koon kaapelikengät ovat materiaaliltaan alumiinia ja 4 mm^2 koon kaapelikengät ovat materiaaliltaan kuparia, jotka on pinnoitettu tinalla. Lisäksi 4 mm^2 koon kaapelikengän sisällä on tinattu messinkiverkko. Jatkoholkeista tutkittaviksi valitaan 10 mm^2 koon bimetallijatkoholkki sekä 16 mm^2 koon alumiinijohtimelle tarkoitettu jatkoholkki, joka on materiaaliltaan tinapinnoitettua kuparia ja jonka sisällä on tinapinnoitettu messinkiverkko. Työn yhtenä tavoitteena on selvittää, ovatko tällä hetkellä tuotannossa käytettävät kaapelikengät soveltuvia käytettäväksi alumiinikääminän sähköisissä liitoksissa. Työssä vertailtiin liitoksia, joissa käytetään alumiinilangan kanssa alumiinijohtimelle tarkoitettuja kaapelikenkiä ja jatkoholkkeja, tuotannossa käytössä oleviin kaapelikenkiin ja jatkoholkeihin. Työn keskeisiä kysymyksiä ovat alumiinin pintaan muodostuvan oksidikerroksen ja galvaanisen korroosion vaikutus liitokseen. Näistä ilmiöistä sähköisen liitoksen kannalta haitallisempi on alumiinin pintaan muodostuva oksidikerros. Oksidikerroksen muodostumista pyritään alumiinijohtimelle suunnitelluissa alumiinisissa kaapelikengissä ja jatkoholkeissa estämään liitosrasvalla. Tinapinnoitetuissa kuparisissa kaapelikengissä ja jatkoholkeissa kyseistä ilmiötä pyritään estämään edellä mainitulla tinapinnoitetulla messinkiverkolla.

Työssä tutkittiin kolmea erilaista liitosta: alumiinijohdin liitettynä sille tarkoitettuun kaapelikenkään, alumiinijohdin liitettynä tuotannossa käytettävään kaapelikenkään ja kuparijohdin liitettynä tuotannossa käytettävään kaapelikenkään. Jokaisesta liitoksesta tehtiin erilaisia koekappaleita aikaisemmin mainituissa kokoluokissa. Liitoksia testattiin kahdella erilaisella kokeella, lämpövanhennuskokeella ja vetolujuuskokeella. Lämpövanhennuksen tarkoituksena oli tutkia liitosten luotettavuutta ja liitosresistanssin muutosta liitosten ikääntymisen jälkeen. Vetokokeilla taas tutkittiin eri kaapelikenkien ja jatkoholkkien vetolujuutta. Lisäksi selvitettiin, kuinka lämpövanhennus vaikuttaa liitosten vetolujuuksiin.

Lämpövanhennuskokeen perusteella alumiinijohtimelle suunniteltujen kaapelikenkien ja jatkoholkkien käyttämisestä näyttää olevan etua pidempiaikaisessa käytössä. Vetokokeiden perusteella alumiinijohtimelle tarkoitettujen kaapelikenkien vetolujuus jää hieman pienemmäksi verrattuna tuotannossa käytettäviin kaapelikenkiin. Erot ovat kuitenkin melko pieniä ja vetokokeiden jälkeen lankojen katkeamiskohtien tarkastelu antaa viitteitä siitä, että liitoksiin käytettävä puristin saattaa puristaa holkkia liikaa, mikä taas johtaa alumiinilankojen liialliseen puristumiseen. Tutkimusten perusteella etenkin 4 mm² ja 16 mm² kokoluokissa tutkimuksiin valitut kaapelikengät ja jatkoholkit osoittautuivat potentiaalisiksi vaihtoehdoiksi alumiinikääminnän liitoksiin. Kummassakin kokoluokassa alumiinijohtimelle tarkoitettut kaapelikengät käyttäytyivät molemmissa kokeissa samantyyllisesti kuin tällä hetkellä tuotannossa käytössä olevat kuparijohtimien liitokset. Tuotannossa käytettävät kaapelikengät ja jatkoholkit vaikuttavat tutkimusten teorian ja tutkimusten perusteella siltä, että ne eivät sovellu pitkäaikaiseen käyttöön alumiinikääminnän kanssa.

Tässä työssä esitettyjen tutkimusten perusteella saatiin paljon lisätietoa siitä, miten alumiinilanka käyttäytyy eri johdinkokoluokissa verrattuna vastaaviin kuparilangallisiin johtimiin. Tutkimukseen valittujen kaapelikenkien ja jatkoholkkien määrä on suppea, joten lisätutkimukset erilaisista ja eri valmistajien kaapelikengistä ja jatkoholkeista ovat tarpeellisia. Alaluvuissa 6.2 ja 6.3 esitetään perinteiselle puristusliitokselle vaihtoehtoja, joiden avulla saattaa olla mahdollista käyttää tuotannossa käytettäviä kaapelikenkiä alumiinilangan kanssa. Nämä liitosmenetelmät ovat hot crimping ja ultraäänihitsaus. Liitostavat

ovat potentiaalisia liitosmenetelmiä alumiinikämminnällä toteutetun oikosulkumoottorin sähköisiin liitoksiin.

Tutkimuksista näkyy selkeästi, että tällä hetkellä käytössä oleva liitosmenetelmä on laadultaan erittäin hyvä. Tutkimuksissa näkyy myös selkeästi, että alumiini on pehmeämpää ja näin ollen heikompa materiaalia kuin kupari. Vaikka tutkittavien kaapelikenkien ja jatkoholkkien määrä on pieni, niin kuitenkin tässä työssä esitettyjen tutkimusten perusteella on todennäköisesti helppo lähteä tekemään jatkotutkimuksia alumiinilangalla käänittyjen oikosulkumoottoreiden sähköisiin liitoksiin. Jatkossa myös käytettävien liitettävien materiaalien käyttäytymisen analyysi voisi tuottaa lisäymmärrystä tuotekehityksen tueksi.

LÄHDELUETTELO

- ABB (2009). *Sähkömoottoriden hyötysuhteella on väliä*. [online]. Saatavana internetistä <URL: <http://www.abb.fi/cawp/seitp202/9324577570fc2313c125765e002bfcd2.asp>>.
- ABB (2018a). *Wiki*. Suunnittelun wikiohjeet. Julkaisematon.
- ABB (2018b). *Motors and Generators työohjeet*. Julkaisematon.
- ABB (2018c). *Low voltage process performance motors*. ABB Oy. Tuotekatalogi. 148 s.
- ABB (2018d). *ABB:n kaapelikenkästandardi*. Julkaisematon.
- Aluminum association (2019). *Aluminum Alloys 101*. [online] Saatavana internetistä <URL: <https://www.aluminum.org/resources/industry-standards/aluminum-alloys-101>>.
- Amada (2018). *Hot Crimping Magnet Wire to Cable Shoes or Terminals*. [online] Saatavana internetistä <URL: <https://www.amadamiyachi.eu/knowledge-base/hot-crimping>>.
- Aromaa, Jari (2005). *Korroosionestotekniikan perusteet*. Tutkimusraportti. Espoo: Helsinki University of Technology 2005. 132 s. ISBN 951-22-7829-4.
- Aura, Lauri & Antti J. Tonteri (2002). *Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteita*. 3.–4. Painos. Helsinki. WSOY. 448 s. ISBN 951-0-21385-3.
- Braunovic, Milenko., Konchiëtis, V. V. & Myshkin, Nikolaï Konstantinovich. *Electrical contacts: fundamentals, applications and technology*. Boca Raton: CRC press 2007. 645 p. ISBN 1574447270.

- Bolsinger, Christoph., Zorn, Matthias., Birke, Kai Peter (2017). Electrical contact resistance measurements of clamped battery cell connectors for cylindrical 18650 battery cells. *Journal of energy storage*. [Verkkodokumentti] [12/2017], 29–36. Saatavana internetistä <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X16301529>>.
- Clufix (2018). *Coatings and anticorrosion protection*. [online] [Viitattu 21.11.2018] Saatavana internetistä <URL: http://www.clufix.com/it/images2/plaquette_revete-ments_en.pdf#page=7>.
- Copper alliance (2019). *Introduction to the Copper Conductivity Materials Database*. [online] [Viitattu 3.2.2019] Saatavana internetistä <URL: <https://copperalliance.org.uk/about-copper/conductivity-materials/>>.
- Frank, Ronald F., Morton, Christopher P. (2007). Comparative Corrosion and Current Burst Testing of Copper and Aluminum Electrical Power Connectors. *IEEE transactions on industry applications*. [Verkkodokumentti] 43:2 [19.3.2007], 462–468. Saatavana internetistä: <URL: <https://ieeexplore-ieee-org.proxy.uwasa.fi/document/4132868>>.
- Fontana (1987). *Corrosion engineering*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill 1987. 556 p. ISBN 0-07-100360-6.
- Graser, Peter (2016). Copper Clad Aluminum Building Wire for Use in Residential Branch Circuit Wiring. *IAEI*. [online] [Viitattu 23.2.2019] Saatavana internetistä <URL: <https://iaeimagazine.org/magazine/2016/11/10/copper-clad-aluminum-building-wire-for-use-in-residential-branch-circuit-wiring/>>.
- Hietalahti 2011: Hietalahti, Lauri (2011). *Muuntajat ja sähkökoneet*. Tampere: Amk-kustannus Oy Tammertekniikka. 130 s. ISBN 978-952-5491-72-2.

Hughes, Austin (2006). *Electric motors and drives: fundamentals, types, and applications*. Amsterdam: Boston, Elsevier/Newnes cop. 2006. 410 p. ISBN 978-0-7506-4718-20-7506-4718-3.

Hyvönen, Arttu (2016). *Pienten oikosulkumoottoreiden laakerivirrat*. Vaasan yliopisto. Diplomityö. 73 s.

IEC 60228 (2014). *Conductors of insulated cables*. 31 p.

IEC 60352-2 (2013). *Solderless connections – Part 2: Crimped connections – General requirements, test methods and practical guidance*. 112 p.

IEC 60947-7-2 (2009). *Low-voltage switchgear and controlgear - Part 7-2: Ancillary equipment - Protective conductor terminal blocks for copper conductors*. 37 p.

IEC 61238-1-1 (2018). *Compression and mechanical connectors for power cables –Part 1-1: Test methods and requirements for compression and mechanical connectors for power cables for rated voltages up to 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) tested on non-insulated conductors*. 81 p.

Klauke (2018a). Klauken tuotekatalogi. [online] Saatavana internetistä <URL: https://flipbooks.klauke.com/klauke-catalogue-en-05-2018/files/assets/common/downloads/Klauke_Catalogue_2018_GB.pdf>.

Klauke (2018b). *Lightweight, special processing: Aluminium cable lugs and connectors*. [online] [Viitattu 2.11.2018] Saatavana internetistä <URL: <https://www.klauke.com/en/electrical/sectors-solutions/technical-reports/installation-of-al-connectors/>>.

Klauke (2018c). *Aluminium and copper: making the connection*. [online] [Viitattu 13.12.2018] Saatavana internetistä <URL: <https://www.klauke.com/en/electrical/sectors-solutions/technical-reports/connecting-aluminium-and-copper/>>.

Känsäkangas, Tero (2018). ABB Oy. Haastattelu, Vaasa 1.11.2018.

Malinen, Jukka (2005). *Induktiomoottorin hyötysuhdemittaukset verkko- ja taajuusmuuttajakäytössä*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 86 s.

Maritime (2013). *CHAPTER 6 - ELECTROMAGNETISM MAGNETS FROM ELECTRICITY*. Koulutusmateriaali. [online] Saatavana internetistä <URL: <https://maritime.org/doc/radio/chap6.htm>>.

Market insiders (2018). Kuparin ja alumiinin hintatiedot. [online] [Viitattu 1.12.2018] Saatavana internetistä <URL: <https://markets.businessinsider.com/commodities>>.

Ouneva (2018a). Asennusohje. [online] Ladattavissa internetistä <URL: <https://www.ounevagroup.fi/fi/ouneva-products/tuotteet/al-kaapelikeng%EF%BF%BD%EF%BF%BDt-ja-liittimet/rola/?PHPSESSID=87109520106bcec68f4c2c73f61ef036>>.

Ouneva (2018b). JHR 16 Tuotekortti. [online] Ladattavissa internetistä <URL: <https://www.ounevagroup.fi/fi/ouneva-products/tuotteet/liittimet/al-cu-jatkoliittimet/>>.

Ouneva (2019). Tuotekatalogi. [online] Ladattavissa internetistä <URL: <https://www.ounevagroup.fi/fi/ouneva-products/tuotteet/>>.

Peda.net (2019). *Taulukot*. Opetusmateriaali. [online] Saatavana internetistä <URL: <https://peda.net/pieksamaki/peruskoulu/hiekanp%C3%A4%C3%A4n-koulu/ol/fysiikka/8-luokka/8gh/efysiikka-8/taulukot>>.

Penetrox (2019). Tuoteseloste. [online] Saatavana internetistä <URL: <https://www.hubbell.com/burndy/en/Products/Power-Utilities/Inhibitors-Contact-Aids-Sealants-Paint/Oxide-Inhibitor/P8A/p/1907260#prod-detail-section>>.

Phoenix Contact (2018). *Liittimet*. [online] Saatavana internetistä <URL: https://www.phoenixcontact.com/online/portal/fi?1dmy&urile=wcm%3apath%3a/fifi/web/main/products/subcategory_pages/tools_p-25/ff2f2d96-ef54-4f45-93fd-cb797815a76f/ff2f2d96-ef54-4f45-93fd-cb797815a76f>.

Pyrhönen, Juha., Jokinen, Tapani & Hrabovcová, Valéria (2014). *Design of rotating electrical machines*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley 2014. 584 p. ISBN 978-1-118-58157-5.

Ritmacon (2018). *Ultraäänisovellukset*. [online] [Viitattu 24.11.2018] Saatavana internetistä <URL: <http://www.ritmacon.fi/articles/671/>>.

Romano, Jay (2006). The Fire Dangers of Aluminum Wiring. *The New York Times*. [online] [Viitattu 28.10.2018] Saatavana internetistä <URL: <https://www.nytimes.com/2006/02/19/realestate/the-fire-dangers-of-aluminum-wiring.html>>.

Schmidth H., V. Seipel & W. Stabroth (2015). *Durable, fully automatic termination of Al stranded conductors using the LITEALUM crimp*. , Bensheim: TE Connectivity family of companies.

Siemens (2014). *Aluminum versus Copper Conductors*. [online] [Viitattu 15.2.2018] Saatavana internetistä <URL: <https://w3.siemens.com/powerdistribution/global/EN/tip/focus-markets/Documents/Siemens-Data-Center-Whitepaper-Aluminum-versus-Copper.pdf>>.

Strunk (2019). *Hot-crimping technology*. [online] [Viitattu 7.5.2019] Saatavana internetistä <URL: <http://www.strunk.cz/en/applikationen/heisscrimptechnologie/>>.

TE (2018). Datalehti. [online] Saatavana internetistä <URL: https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Customer+Drawing%7F51979%7FJ%7Fpdf%7FEng-lish%7FENG_CD_51979_J.pdf%7F51979-3>.

Teknoliateollisuus (2006). *Raaka-aine käsikirja alumiini*. Helsinki: Teknologiainfo Teknova 2006. 237 s. ISBN 951-817-743-0.

Telesonic (2019). *Applications*. [online] [Viitattu 13.1.2019] Saatavana internetistä <URL: <https://www.telsonic.com/en/application-finder/#automotive>>.

TUT (2005). *Korroosio*. Opetusmateriaali. [online] [viitattu 23.4.2019] Saatavana internetistä <URL: http://www.tut.fi/vmv/2005/vmv_2_1_6.php>.

Vlad, Maria (2007). *Ultrasonic welding of aluminum: a practical study in consistency, part marking and control modes*. Iowa State University. Väitöskirja. 116 p.

Verkkonen, Vesa (2007). *Sähkömoottorikäytöt 2 – epätahtikoneet*. Luentomoniste. Julkaisematon. Vaasan ammattikorkeakoulu. 103 s.

Vesti, Jussi (2013). *Kupariroottorin käyttö korkean hyötysuhteen oikosulkumoottorissa*. Vaasan yliopisto. Diplomityö. Sähkötekniikka.

VTT (2007). *Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset elektroniikassa*. [online] Saatavana <URL: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2007/P623.pdf>>.

Younis, Ahmed (2011). *Protection of Aluminum Alloy (AA7075) from Corrosion by Sol-Gel Technique*. Chemnitz university of technology. Väitöskirja. 112 p.