



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tuomas Laitio

MUUNTAJAN VIRTAKISKOJEN
PULTTILIITOSTEN TUTKIMINEN

Tekniikka
2023

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Tuomas Laitio
Opinnäytetyön nimi	Muuntajan virtakiskojen pulttiliitosten tutkiminen
Vuosi	2023
Kieli	suomi
Sivumäärä	76 + 5 liitettä
Ohjaajat	Jari Koski & Miika Rinne

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan muuntajan virtakiskojen erilaisia pulttiliitoksia. Erilaiset liitostyypit tehtiin käyttäen eri kiskomateriaaleja, eri vastakappaleita pulteille ja karhentamalla alumiinikiskot eritavoilla. Opinnäytetyö tehtiin Hitachi Energy Vaasan muuntajatehtaan tutkimus- ja tuotekehitysosastolle.

Tutkimuksessa käytettiin aineistona Hitachi Energyn sisäisiä materiaaleja, asiantuntijan kommentteja, internet-artikkeleita ja IEC-standardia. Tutkimusmenetelmänä oli kiskoista rakennettu mittauskokoontyö, jota tutkittiin syklisellä rasituskokeella tarkoituksena tutkia liitosten vanhenemista. Opinnäytetyössä käsitellään alumiini- ja kuparikiskojen välisiä pulttiliitoksia ja etsittiin ratkaisuja alumiinioksidista johtuviin ongelmiin.

Jokainen tutkittu liitostyyppi voitiin todeta toimivaksi. Vastakappaleen tai karhennustylin vaikutusta liitosresistansseihin ei havaittu.

ABSTRACT

Author	Tuomas Laitio
Title	Research of an Electrical Bar Connections in a Transformer
Year	2023
Language	Finnish
Pages	76 + 5 Appendices
Name of Supervisors	Jari Koski & Miika Rinne

In this study, various bolted connections of transformer busbars are investigated. Different types of connections were made using different busbar materials, different counterparts for the bolts, and by roughening the aluminum busbars in different ways. The thesis was conducted for the research and development department of the Hitachi Energy Vaasa transformer factory.

The study utilized internal materials from Hitachi Energy, expert comments, internet articles, and the IEC standard as source material. The research methodology involves constructing a measurement setup using busbars and subjecting it to cyclic stress testing with the aim of studying the aging of connections. The thesis addresses the bolted connections between aluminum and copper busbars and explores solutions to issues arising from aluminum oxide.

Every examined type of connection was found to be functional. No significant influence of the counterpart or roughening style on the connection resistances was observed.

Keywords Hitachi Energy, transformer, electrical connection, bar

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	13
1.1	Tutkimusongelma	13
1.2	Tavoite	13
1.3	Toimeksiantaja	14
1.3.1	ABB	14
1.3.2	Hitachi	14
1.3.3	Hitachi ABB Power Grids	14
1.3.4	Hitachi Energy muuntajatehdas.....	15
2	MUUNTAJA	16
2.1	Toiminta	17
2.2	Rakenne	17
2.2.1	Aktiiviosa	17
2.2.2	Virtakiskot ja johdotus	20
2.2.3	Säiliö	21
2.2.4	Muuntajaöljy ja eristysrakenteet.....	23
3	LIITOKSEEN SYNTYVÄN PURISTUSVOIMAN TUTKIMINEN.....	24
3.1	Mittauslaitteisto.....	24
3.2	Tutkimusongelma	24
3.3	Tavoite	25
3.4	Toteutus	25
3.5	Tulokset.....	26
3.5.1	Nyloc-mutteri	26
3.5.2	Niittimutteri	27
3.6	Virheanalyysi.....	28
4	ALUMIINI JA KUPARI VIRTALIITOKSISSA	29

4.1	Alumiini	30
4.1.1	EN AW6101 alumiiniseos	30
4.1.2	Alumiinin oksidikerros.....	31
4.2	Kupari	31
4.3	Galvaaninen korroosio	32
5	STANDARDI IEC 61238-1-1	33
5.1	Standardin mukaiset raja-arvot	33
5.1.1	Alkuperäinen hajonta δ pistekaaviossa	33
5.1.2	Keskiarvon hajonta β pistekaaviossa	34
5.1.3	Muutos resistanssin kertoimessa D	35
5.1.4	Resistanssin kertoimen suhde λ	37
5.1.5	Enimmäislämpötilat θ_{MAX}	37
6	TUTKITTAVAT LIITOKSET.....	38
6.1	Liitostyypit.....	39
6.1.1	Type 1	39
6.1.2	Type 2	39
6.1.3	Type 3	40
6.1.4	Type 4	40
6.1.5	Type 5	41
6.1.6	Type 6	41
6.2	Alumiinikiskojen karhennukset.....	42
6.2.1	Karhennustyyli A	42
6.2.2	Karhennustyyli B	45
6.2.3	Karhennustyyli C.....	47
7	MITTAUSLAITTEISTO	49
8	TUTKIMUSTULOKSET	54
8.1	Ensimmäinen mittaus	54
8.2	Toinen mittaus	55
8.3	Kolmas mittaus	56
8.4	Neljäs ja viides mittaus	57

8.5 Tulokset karhennustyyleitään	62
8.5.1 Karhennustyyli A	62
8.5.2 Karhennustyyli B	63
8.5.3 Karhennustyyli C.....	64
8.6 Eri karhennustyylien vertailu keskenään.....	65
8.7 Tulokset liittostyypeittäin	66
8.7.1 Type 2.....	66
8.7.2 Type 3.....	67
8.7.3 Type 4.....	67
8.7.4 Type 5.....	68
8.7.5 Type 6.....	68
9 TULOSTEN ANALYYSI	69
9.1 IEC 61238-1-1 mukaiset raja-arvot	70
9.1.1 Keskiarvon hajonta β	71
9.1.2 Muutos resistanssin kertoimessa D	72
9.1.3 Resistanssin kertoimien suhde λ	73
10 YHTEENVETO	74

KUVIO LUETTELO

Kuvio 1. Muuntaja.	20
Kuvio 2. Aktiiviosa.	21
Kuvio 3. Rautasydän.	22
Kuvio 4. Erään muuntajan alajännitekäämi.	23
Kuvio 5. Erään muuntajan yläjännitekäämi.	23
Kuvio 6. Erään muuntajan yläjännitekytkentä.	24
Kuvio 7. Erään muuntajan alajännitekytkentä.	25
Kuvio 8. Aaltolevysäiliö.	26
Kuvio 9. Radiaattorisäiliö.	27
Kuvio 10. Puristusvoima tutkimuksen mittauskoonpano.	29
Kuvio 11. Niittimutteri.	31
Kuvio 12. Korroosio alumiinissa.	33
Kuvio 13. Alumiinin oksidikerros.	35
Kuvio 14. Type 1 liitos.	43
Kuvio 15. Type 2 liitos.	43
Kuvio 16. Type 3 liitos.	44
Kuvio 17. Type 4 liitos.	44
Kuvio 18. Type 5 liitos.	45
Kuvio 19. Type 6 liitos.	45
Kuvio 20. Karhennustyyli A.	47
Kuvio 21. Karhennustyyli A läheltä.	47

Kuvio 22. Karhennustyylin A tekemä jälki kuparikiskoon.	48
Kuvio 23. Karhennustyyli B.	49
Kuvio 24. Karhennustyyli B läheltä.	50
Kuvio 25. Karhennustyylin B tekemä jälki kuparikiskoon.	50
Kuvio 26. Karhennustyyli C.	51
Kuvio 27. Karhennustyyli C läheltä.	52
Kuvio 28. Karhennustyylin C tekemä jälki kuparikiskoon.	52
Kuvio 29. Mittauskokoontapano.	53
Kuvio 30. Suurtehogeneraattori.	54
Kuvio 31. Hioki 3284 pihtivirtamittari.	55
Kuvio 32. Fluke 289 True RMS Multimeter -yleismittari.	56
Kuvio 33. INTAB PC-logger.	57
Kuvio 34. Liitosresistanssin muutos prosentteina lähtötilanteesta.	59
Kuvio 35. Liitosresistanssin muutos prosentteina lähtötilanteesta.	60
Kuvio 36. Liitosresistanssin muutos prosentteina edelliseen mittaukseen verrattuna.	61
Kuvio 37. Liitosresistanssin muutos prosentteina lähtötilanteesta.	62
Kuvio 38. Liitosresistanssin muutos prosentteina edelliseen mittaukseen verrattuna.	63
Kuvio 39. Liitosresistanssin muutos prosentteina lähtötilanteesta.	64
Kuvio 40. Liitosresistanssin muutos prosentteina edelliseen mittaukseen verrattuna.	65
Kuvio 41. Karhennustyylin A mittaustulokset XY-kuvaajassa.	66
Kuvio 42. Karhennustyylin B mittaustulokset XY-kuvaajassa.	67

Kuvio 43. Karhennustyylin C mittaustulokset XY-kuvaajassa.	68
Kuvio 44. Eri karhennuksien keskiarvot verrattuna toisiinsa XY-kuvaajassa.	69
Kuvio 45. Type 2 eri karhennuksilla.	70
Kuvio 46. Type 3 eri karhennuksilla.	71
Kuvio 47. Type 4 eri karhennuksilla.	71
Kuvio 48. Type 5 eri karhennuksilla.	72
Kuvio 49. Type 6 eri karhennuksilla.	72
Kuvio 50 Keskiarvon hajonta β	75
Kuvio 51. Muutos resistanssin kertoimessa D.	76
Kuvio 52. Resistanssin kertoimien suhde λ	77

TAULUKKO- JA KAAVA LUETTELO

Taulukko 1. Nyloc-mutterin mittaustulokset.	30
Taulukko 2. Niittimutterin mittaustulokset.	31
Taulukko 3. Tutkittavat liitokset ja niiden järjestys mittauskokoospanossa.	42
Kaava 1. Keskiarvo kokeen alussa.	37
Kaava 2. Keskihajonta kokeen alussa.	38
Kaava 3. Alkuperäinen hajonta.	38
Kaava 4. Keskiarvo välillä $x = -5 \dots +5$	38
Kaava 5. Keskiarvo.	38
Kaava 6. Keskihajonta.	38
Kaava 7. Keskiarvon hajonta.	39

Kaava 8. Parhaiten sopiva viiva.	39
Kaava 9. Yksikkökohtainen muutos resistanssin kertoimessa.	39
Kaava 10. Luottamusväli resistanssin kertoimessa.	39
Kaava 11. Arvioitu keskivirhe.	40
Kaava 12. Yksikkökohtainen hajonta.	40
Kaava 13. Muutos resistanssin kertoimelle.	40
Kaava 14. Resistanssin keroimen suhde.	41

LIITELUETTELO

Liite 1. Ensimmäinen mittaus.

Liite 2. Toinen mittaus.

Liite 3. Kolmas mittaus.

Liite 4. Neljäs mittaus.

Liite 5. Viides mittaus.

LYHENTEET JA TERMIT

N
Nm
mm
kV
mV
A
 Ω
 μ

Newton
Newtonmetri
Millimetri
Kilovoltti
Millivoltti
Ampeeri
Ohmi
Mikro

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella mittauskokoontaminen, jossa tutkittiin erilaisten alumiini- ja kuparivirtakiskojen pulttiliitosten liitokseen syntyvää resistanssia sekä uusien, testaamattomien, niittimuttereiden puristusvoimaa. Opinnäytetyö tehtiin Hitachi Energy Vaasan muuntajatehtaan tutkimus- ja tuotekehitysosastolle.

1.1 Tutkimusongelma

Kone, jolla alumiinikiskoihin oli ennen tehty karhennukset, oli mennyt epäkuuntoon ja yhtenä tutkimuksen osana oli tutkia uudella koneella tehtyjä erilaisia karhennuksia.

Perinteisesti muuntajan virtakiskot on asennettu muuntajan aktiiviosan ympärille kisko kerrallaan. Uusi tapa on asentaa kiskot yhtenä pakettina, mikä nopeuttaa kokoonpanovaihetta. Ongelmaksi kuitenkin muodostui tiettyjen liitosten kiristäminen. Perinteisen pulttiliitoksen kiristämiseksi itse mutterinvääntimen lisäksi vaaditaan jokin työkalu pitämään vastapuolella olevaa mutteria paikallaan kiristysvaiheessa. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on kehitetty uudet niittimutterit, jotka puristetaan valmiiksi kiskoon kiinni, mikä mahdollistaa liitoksen kiristämisen ilman vastapuolella olevaa työkalua.

1.2 Tavoite

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia muuntajan virtakiskojen pulttiliitoksia rakentamalla kiskoista mittauskokoontaminen ja tekemällä liitoksille syklinen vanhenemiskoe. Kokeen tarkoituksena oli saada selville, miten erilaiset liitokset käyttäytyvät rasituksessa.

1.3 Toimeksiantaja

1.3.1 ABB

ABB muodostettiin tammikuussa 1988 sulauttamalla yhteen ruotsalaisen Asean ja sveitsiläisen Brown Boverin sähkötekniiset liiketoiminnot 50:50-omistusperiaatteella. Nyt ABB on johtava teknologian edelläkävijä, jonka tarjonta kattaa niin sähköistystuotteet, robotit ja liikkeenohjauksen kuin teollisuusautomaation ja sähköverkkoratkaisut. ABB:n kasvu perustuu sen teknologiseen voimaan ja vahvoihin paikallisiin juuriin, joita Suomessa edustaa Strömberg. /1/

1.3.2 Hitachi

Hitachi on japanilainen teknologiajätti, joka on perustettu vuonna 1910. Vuonna 1911 Hitachi kehitti ensimmäisen 2-kVA-muuntajan ja siitä alkoi yrityksen nousu teknologian huipulle. Hitachi on ollut tekemisissä teknologian kanssa koko historiansa ajan, ja suurimpiin keksintöihin kuuluvat täysin automaattinen tiskikone, tietokoneet, kosketusnäytöt sekä sähköverkkojen kehitykset. /2/

1.3.3 Hitachi ABB Power Grids

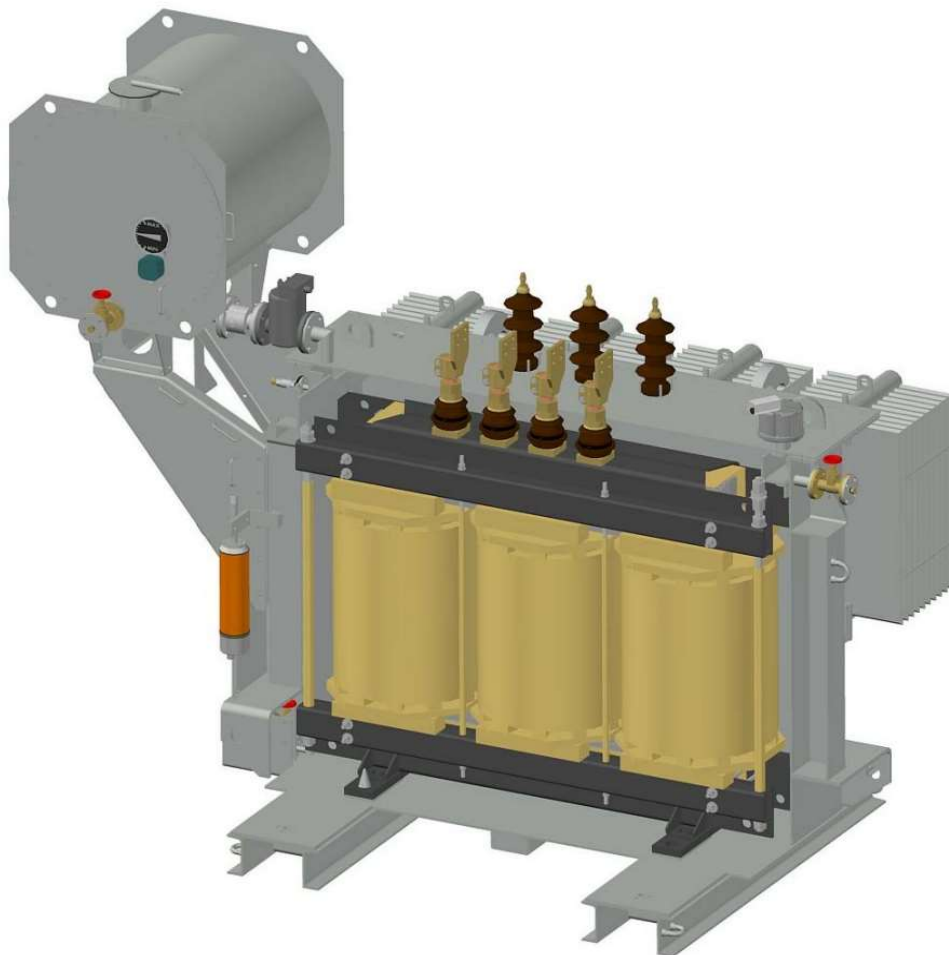
Hitachi ABB Power Grids -yhteisyritys syntyi 01.07.2020, kun japanilaisjätti Hitachi osti ABB:n Power Grids -toiminnan. Hitachin osuus kaupassa oli 80,1 % ja ABB -konsernin 19,9 %. Yhdistymisen myötä yritys työllistää maailmanlaajuisesti 36 000 ihmistä yli 90 maassa. Yrityksellä on neljä globaalia liiketoiminta-aluetta: Grid Automation, Grid Integration, High Voltage Products ja Transformers /1/. Yhteisyrityksen liiketoiminnan volyymi on noin 10 miljardia Yhdysvaltain dollaria ja pääkonttori sijaitsee Sveitsin Zürichissä. Hitachi ABB Power Grids on edelläkävijä teknologiajohtajana, joka suunnittelee ja kehittää älykkäitä ja ympäristöystävällisiä sähköverkkoja. /3/ Myöhemmin nimeksi vakiintui Hitachi Energy.

1.3.4 Hitachi Energy muuntajatehdas

Muuntajatehtaalla Vaasassa valmistetaan sähkölaitosmuuntajia ja erikoismuuntajia, kuten uuni- ja tasasuuntaajamuuntajia, laiva- ja offshore-muuntajia, taajuusmuuttajakäyttöjen ja rautateiden sähköistysverkon muuntajia sekä kuristimia. Muuntajatehdas vastaa myös Suomen muuntajahuolloista. /4/

2 MUUNTAJA

Muuntaja on sähkölaite ilman liikkuvia osia. Sen toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon, joten se toimii vain vaihtovirralla. Muuntajan päätehtävä on muuntaa sähköjännitettä toiseksi, korkeammaksi tai matalammaksi. Samalla muuntajan tehtävä on usein erottaa galvaanisesti toisistaan virtapiirit, joiden kesken kuitenkin tapahtuu energiansiirtoa. Eräs syy vaihtovirtaverkon suosioon sähköjakelussa on se, että muuntajalla on helppo muuttaa jännitetasoa hyvällä hyötysuhteella. /4/ Kuviossa 1 esimerkki muuntajasta.



Kuvio 1. Muuntaja.

2.1 Toiminta

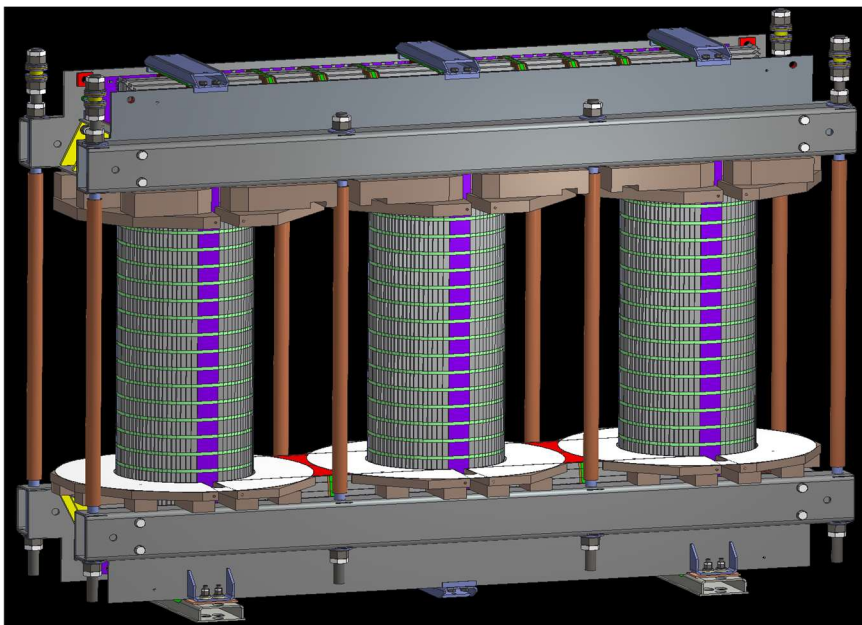
Kun muuntajan ensiökäämiin kytketään vaihtojännite, muodostuu rautasydämeen muuttuva magneettivuo. Kun magneettivuo lävistää samalla sydämellä olevan toisiokäämin, indusoituu siihen jännite. /5/

2.2 Rakenne

Muuntajan rakenne koostuu pääpiirteittäin aktiiviosasta, virtakiskoista ja johdotuksista, säiliöstä, eristysosista sekä jäähdyttävästä ja eristävästä muuntajaöljystä.

2.2.1 Aktiiviosa

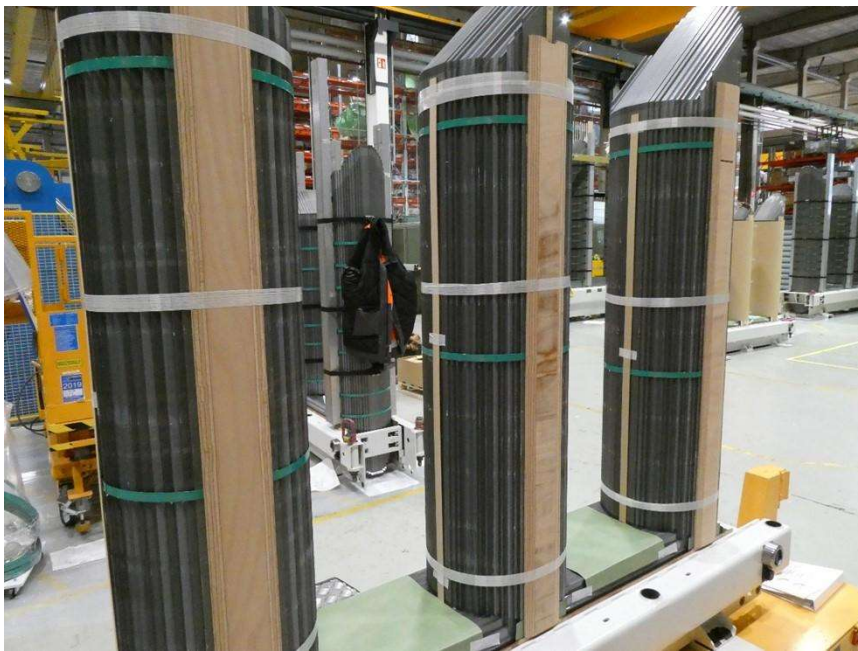
Muuntajan aktiiviosa koostuu rautasydäimestä ja käämityksistä, joita muuntajassa on yleensä vähintään kaksi kappaletta. Muuntajan ensiö on se käämitys, johon teho syötetään. Toisio on se käämitys, josta teho tulee ulos muuntajasta. Yleensä yläjännitekäämitys on ensiöpuoli, mutta esim. generaattorimuuntajassa tai moottorikäytön nostomuuntajassa alajännitekäämitys on ensiöpuoli. /5/ Kuviossa 2 esimerkki aktiiviosasta.



Kuvio 2. Aktiiviosa.

2.2.1.1 Rautasydän

Muuntajasydämen tehtävänä on ohjata magneettivuo kulkemaan haluttujen käämitysten kautta. Kun sähköenergiaa siirretään muuntajan kautta, muutetaan sähköenergia ensin magneettienergiaksi ja sitten päinvastoin. Sydän koostuu pystysuunnassa olevista pylväistä, joita kolmivaihemuuntajassa on normaalisti kolme ja yksivaihemuuntajassa kaksi kappaletta. Pylväät yhdistetään toisiinsa alaja yläikeillä. /5/ Esimerkki rautasydäimestä kuviossa 3.



Kuvio 3. Rautasydän.

2.2.1.2 Käämit

Muuntajassa on vähintään kaksi peruskäämitystä, yläjännite- ja alajännitekäämitys. Erikoismuuntajissa voi olla useita alajännitekäämityksiä. Näiden lisäksi yläjännitepuolella voi olla säätökäämi, joka on kytketty yläjännitekäämin jatkeeksi. Alajännitekäämi sijoitetaan yleensä sisemmäksi lähelle sydäntä, koska se on pienemmän jännitteen vuoksi helpompi eristää sydäimestä. Ylä- ja alajännitekäämin väliin sijoitetaan prespaanilieriöitä eristysrakenteeksi. Käämit valmistetaan puhtaasta kuparista tai sähköalumiinista. Jäähdytystä varten käämeihin voidaan tehdä jäähdytyskanavia, joiden kautta öljy pääsee virtaamaan.

Käämien häviölämpö siirtyy virtaavaan öljyyn ja sitä kautta pois käämeistä. /5/
Kuviossa 4 on alajännitekäämi ja kuviossa 5 on yläjännitekäämi.



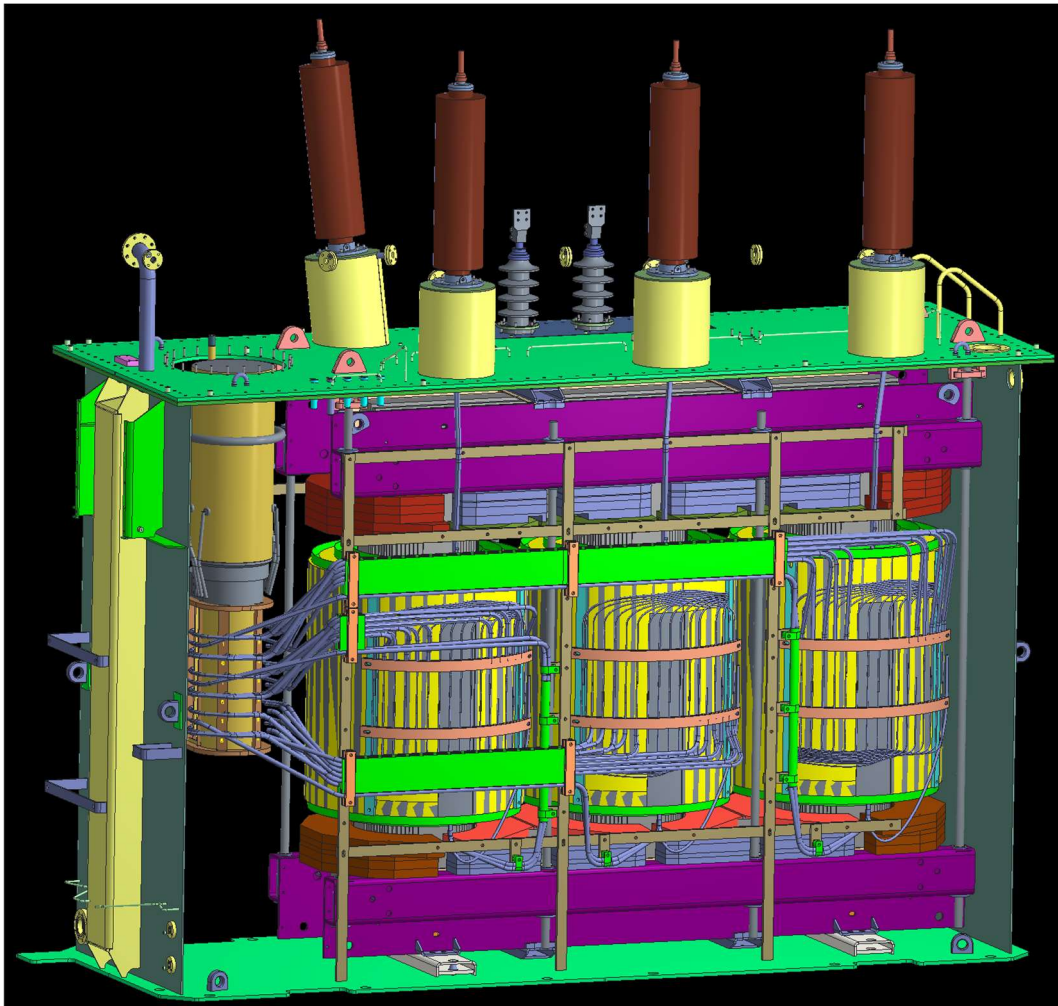
Kuvio 4. Erään muuntajan alajännitekäämi.



Kuvio 5. Erään muuntajan yläjännitekäämi.

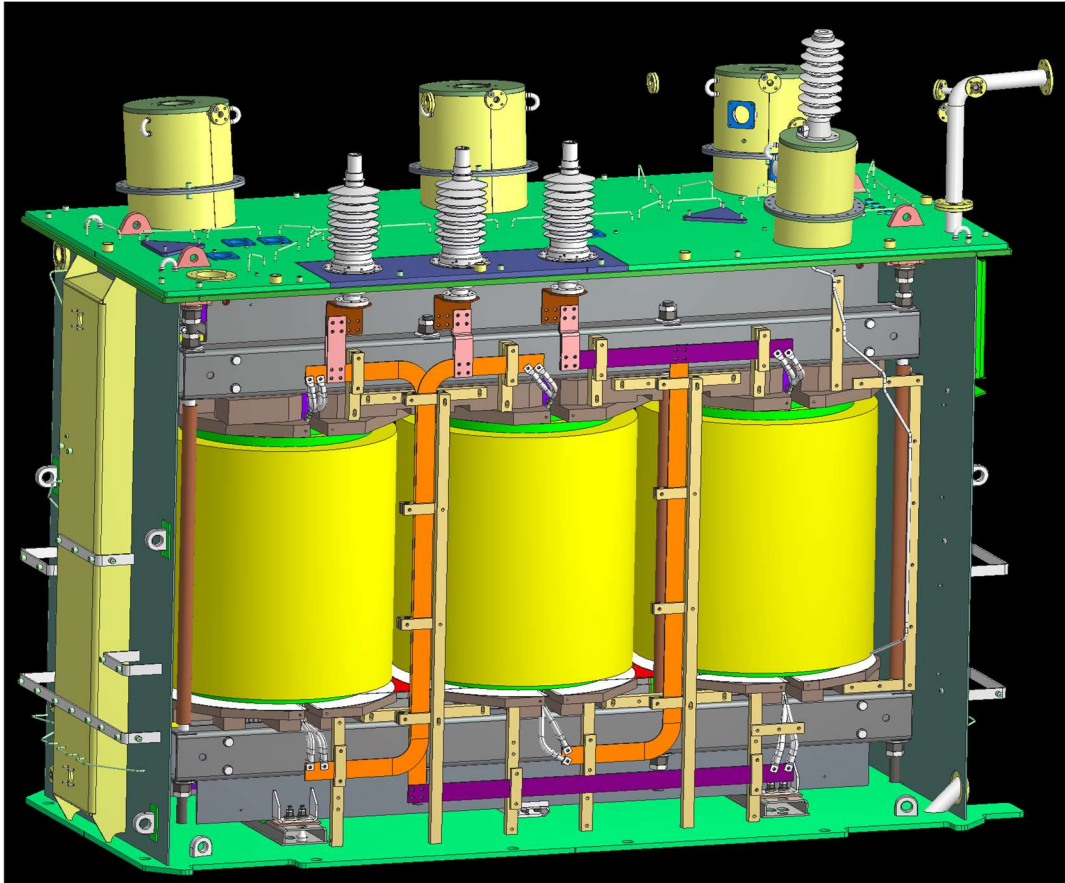
2.2.2 Virtakiskot ja johdotus

Muuntajien sisäiset johdotukset muodostuvat käämien ulosottojen liittämisestä läpivienteihin sekä säätöjohdotuksesta. Sisäisen johdotuksen tehtävänä on siirtää virtaa läpivientien, käämien ja käämikytkimen välillä. Sisäinen johdotus mitoitetaan johtimien suurimman sallitun lämpenemän perusteella. Jos jokin osa muuntajan sisällä lämpenee liikaa, eristys haurastuu tässä kohtaa nopeammin ja voi aiheuttaa kaasun muodostumista. Myöhemmin eristys saattaa pettää ja voi tapahtua läpilyönti. Käämikytkin- ja yläjännitejohdotus tehdään useimmiten kuparikaapeleilla. /5/ Esimerkki yläjännitekytkennästä kuviossa 6.



Kuvio 6. Erään muuntajan yläjännitekytkentä.

Suurivirtaiset alajännitekiskotukset tehdään kupari- tai alumiinikiskoilla, sillä kaapeleilla ei saavuteta riittävää johdinpoikkipinta-alaa, eikä riittävää olkosulkulujuutta. Alajännitepuolen käämilanka tai lankanippu hitsataan tai juotetaan kiinni liitântäkiskoon. /5/ Alajännitekytkentä on esitetty kuviossa 7.



Kuvio 7. Erään muuntajan alajännitekytkentä.

2.2.3 Säiliö

Muuntajan säiliön tehtävänä on toimia muuntajan kantavana runkona, öljysäiliönä ja jäähdyttimenä. Aaltolevysäiliön seinät valmistetaan 1,25 mm paksusta teräslevystä. Teräslevyt aallotetaan erikoiskoneella sopivan suuruisiksi aaltoelementeiksi, jotka toimivat jäähdyttiminä. Aaltolevysäiliö voi olla rakenteeltaan hermeettinen tai paisuntasäiliöllä varustettu. Aaltolevysäiliö on nopea valmistaa ja etenkin hermeettinen muuntaja on käytössä lähes huoltovapaa. /5/ Aaltolevysäiliö kuviossa 8.



Kuvio 8. Aaltolevysäiliö.

Kun aaltolevysäiliön jäähdytyskyky ei riitä poistamaan käämeissä syntyvää lämpöä, käytetään radiaattorisäiliötä. Radiaattorisäiliöihin kiinnitetään erilliset jäähdyttimet, jotka useimmiten ovat radiaattorit. Joissain tapauksissa radiaattoreiden tilalla käytetään vesi- tai ilmajäähdyttimiä. /5/ Radiaattorisäiliö kuviossa 9.



Kuvio 9. Radiaattorisäiliö.

2.2.4 Muuntajaöljy ja eristysrakenteet

Muuntajan rakenteeseen kuuluu oleellisena osana erilaiset eristysrakenteet. Kiinteitä eristeitä ovat paperi, prespaani ja puu. Nestemäinen eriste, muuntajaöljy, toimii sekä eristeenä että jäähdytysaineena. Yleisimmin käytetty öljytyyppi on mineraaliöljy. Kun eristysnesteeltä vaaditaan parempia palonkesto-ominaisuuksia, voidaan käyttää silikoniöljyä tai synteettistä esterä (Midel). Midelillä on hyviä ympäristöominaisuuksia, joiden takia sitä käytetään esim. pohjavesialueilla. Öljy tunkeutuu huokoiseen paperiin ja prespaaniin muodostaen erinomaisen eristerakenteen. /5/

3 LIITOKSEEN SYNTYVÄN PURISTUSVOIMAN TUTKIMINEN

Yksi tutkimuksen osa-alueista oli tutkia uusien niittimuttereiden ja nyloc-muttereiden aiheuttama voima liitokseen, kun käytetään M16-pultteja. Kuppilaatta vaatii noin 173 Nm kiristysmomentin suoristuakseen, kun käytetään teräsmuttereita. Tällöin liitokseen syntyvä voima on 65595 N. Kuppilaatan paksuus sen ollessa alkuperäisessä muodossa on 5,25 mm. Kun kuppilaatta suoristuu, sen paksuus on 4,00 mm.

3.1 Mittauslaitteisto

Mittauslaitteena käytettiin käsikäyttöistä momenttiväännintä, johon saa valita, mihin kiristysmomenttiin liitoksen haluaa kiristää. Vastakappale pidettiin paikallaan puristamalla se kiinni ruuvipenkkiin. Niittimuttereiden tapauksessa käytettiin niittimutterin pyöreään muodon vuoksi kiskoja, johon niittimutteri oli puristettu kiinni. Kisko taas kiinnitettiin edellisten tapaan ruuvipenkkiin kiinni. Kuppilaattojen puristuma mitattiin millimetreinä digitaalisella työntömitalla, jonka tarkkuus on kaksi desimaalia.

3.2 Tutkimusongelma

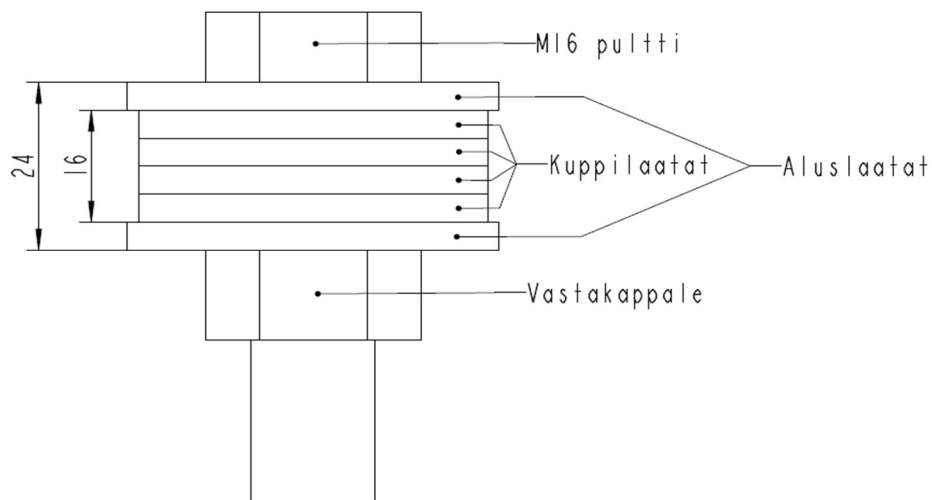
Perinteisesti muuntajan virtakiskot on koottu muuntajan aktiiviosan ympärille kisko ja liitos kerrallaan. Tuotantovaiheen tehostamiseksi on kehitelty uusi tapa, jossa kiskot asennetaan aktiiviosan ympärille yhtenä pakettina. Ongelmaksi kuitenkin tuli joidenkin pulttiliitosten kiristäminen, kun vapaasti pyörivää teräsmutteria ei mahduttu pitämään paikoillaan kiinteällä lenkkiavaimella. Tätä varten suunniteltiin niittimutterit, joita ei tarvitse pitää vastapuolelta kiinni, vaan pultin voi kiristää yhdeltä puolelta. Liitokseen syntyvän puristusvoiman suuruutta ei tiedetä, kun perinteinen teräsmutteri vaihdetaan nyloc- tai niittimutteriin.

3.3 Tavoite

Tavoitteena oli saada selville, mihin kiristysmomenttiin nyloc- tai niittimutterin sisältävät liitokset tulisi kiristää. Tutkimuksessa selvitetään, kuinka suuri kiristysmomentin tulee olla, jotta kuppilaatat suoristuvat nyloc- ja niittimuttereilla.

3.4 Toteutus

Tutkimus toteutettiin asettamalla M16 pultin ja vastakappaleen (nyloc- tai niittimutteri) väliin aluslaatat ja neljä kuppilaattaa. Kuppilaatat aseteltiin siten, että joka toinen on aina toisinpäin. Tällöin voima, joka vaaditaan suoristamaan kuppilaatat ei kasva, mutta saamme mittaustarkkuutta mittaussälin kasvaessa. Momenttivääntimellä liitos kiristettiin ensin 165 Nm momenttiin ja mitattiin työntömitalla, olivatko kuppilaatat suoristuneet. Jos kuppilaatat eivät olleet suoristuneet kokonaan, avattiin liitosta hieman, nostettiin momenttiavaimen kiristysmomentti 173 Nm, ja kiristettiin liitos uudestaan. Toimenpide toteutettiin uudestaan kasvattamalla kiristysmomenttia niin kauan, että kuppilaatat olivat puristuneet täysin suoriksi. Näin saimme tietää momentin, jolla nyloc- ja niittimutteriliitokset tulisi kiristää. Kuviossa 10 tilanne on kiristyneen jälkeen, kun kuppilaatat ovat suoristuneet täysin.



Kuvio 10. Puristusvoima tutkimuksen mittauskoonpano.

3.5 Tulokset

Tuloksista saatiin, mitä haluttiin: suuntaa antavat kiristysmomentit nyloc- ja niittimuttereille.

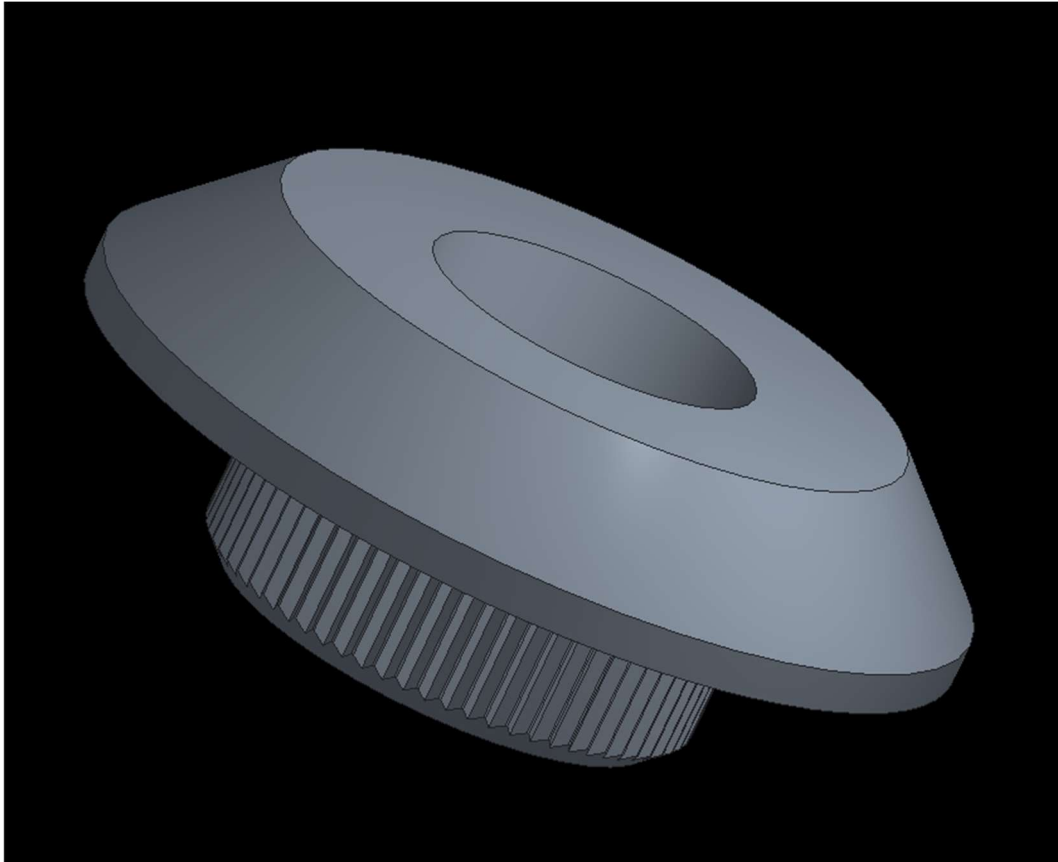
3.5.1 Nyloc-mutteri

Nyloc-mutterin oletettiin saavuttavan haluttu puristusvoima teräsmutterin tapaan kiristysmomentin ollessa 173 Nm. Tämä piti mittaustulosten perusteella paikkansa.

Taulukko 1. Nyloc-mutterin mittaustulokset.

Kiristysmomentti (Nm)	Puristuma (mm)
165	17
173	16
180	16
185	16

3.5.2 Niittimutteri



Kuvio 11. Niittimutteri.

Niittimutterin tapauksessa oletettiin kiristysmomentin olevan suurin piirtein samaa luokkaa nyloc-mutterin kanssa. Taulukossa 2 listattuna niittimutterilla saadut tulokset. Tuloksista voidaan päätellä, että oletus piti paikkansa. Kuviossa 11 esitettyä Creolla mallinnettu niittimutteri.

Taulukko 2. Niittimutterin mittaustulokset.

Kiristysmomentti (Nm)	Puristuma (mm)
165	17
173	16
180	16
185	16

3.6 Virheanalyysi

Mahdollisia satunnaisia virheitä puristusvoimatutkimuksessa syntyi käsikäyttöisistä mittauslaitteista sekä henkilöstä, joka tutkimuksen toteutti. Liitosta kiristäessä tulisi liike pitää mahdollisimman lineaarisena, jolloin momenttivääntimeen asetettu raja naksahaa oikeassa kohdassa. Toteutus oli kuitenkin haastavaa kiristysmomenttien ollessa luokkaa 165–185 Nm, sillä liitoksen kiristäminen vaatii melko paljon voimaa käyttäjältä, jolloin liikkeestä tulee helposti nykivä. Digitaalinen työntömitta itsessään oli tarkka, mutta mahdollinen mittausvirhe voi syntyä, kun henkilö, joka mittauksen suorittaa, asettaa työntömitan kynnet eri kohtaan kuppilaattaa.

4 ALUMIINI JA KUPARI VIRTALIITOKSISSA

Alumiinijohtimien liitoksissa on otettava huomioon alumiinin pinnan oksidoituminen eli hapettuminen. Liitostekniikan kannalta alumiinin pinnan oksidikalvo on ongelmallinen sen suuren kovuuden ja huonon johtokyvyn vuoksi. Alumiinin pinnalle oksidikalvo muodostuu jo muutamassa minuutissa.

Kuparin ollessa jalometalli ja alumiinin epäjalo, on liitoksissa myös otettava huomioon metallien jalouseroinen ja tästä johtuva galvaaninen korroosio. /7/ Kuviossa 12 voidaan havaita korroosio alumiinissa.



Kuvio 12. Korroosio alumiinissa.

4.1 Alumiini

Alumiini on materiaalina yleisesti käytetty hopeanvärinen metalli, joka on pehmeä ja helposti työstettävää. Sitä voidaan käsitellä laajasti kuten mm. kylmämuokata, valssata, valaa, ekstruudata ja hitsata. Alumiini on kevyt ja helposti muokattava metalli, joka on myös helposti kierrätettävää. Se kestää hyvin korroosiota pinnalle muodostuvan suojaavan oksidikerroksen takia, joka uusiutuu itsestään naarmun tullessa. Alumiini ei ole magneettinen, sillä on hyvä lämmön- sekä sähkönjohtokyky ja sitä hyödynnetään paljon elektroniikkateollisuudessa. Puhtaana alumiini on pehmeä metalli, mutta seostamalla muita metalleja alumiinin joukkoon, voidaan sitä lujittaa ja muuttaa alumiinin muitakin ominaisuuksia. /7/

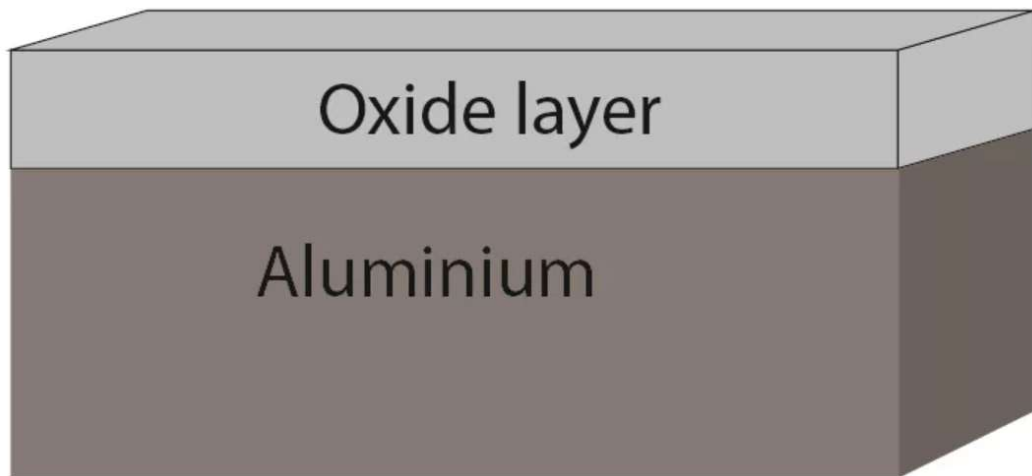
4.1.1 EN AW6101 alumiiniseos

Alumiiniseokset jaotellaan eri sarjoihin niiden seosaineiden perusteella. Sarjat voidaan esittää eurooppalaisen nimikejärjestelmän mukaisesti esimerkiksi EN-AW-6101, jossa EN on etuliite, A tarkoittaa alumiinia, W muokattua tuotetta ja 6101 on 6000-sarjaan kuuluva tietty alumiiniseos. /7/

6101 alumiini on sähkönjohtavuudeltaan ja mekaaniselta vahvuudeltaan erinomainen alumiiniseos. Alumiiniseos koostuu alumiinista (Al), magnesiumista (Mg), silikonista (Si), raudasta (Fe), sinkistä (Zn), kuparista (Cu), boorista (B), mangaanista (Mn) ja kromista (Cr). /6/

4.1.2 Alumiinin oksidikerros

Verrattuna moneen muuhun metalliin, alumiinilla on hyvä korroosion kestävyys. Alumiini muodostaa itse ohuen oksidikerroksen, kun se on kosketuksissa hapen kanssa. Oksidikerros suojelee alumiinia korroosiolta ja jos alumiinin pinta vaurioituu, muodostuu heti uusi oksidikerros pintaan, jos happea on saatavilla. Jos alumiinia säilytetään tilassa, jossa ilmanlämpötila ei vaihdu ja se ei altistu kosteudelle, alumiinin oma oksidikerros suojelee metallia korroosiota vastaan. /8/ Oksidikerroksen haittapuolena virtaliitoksissa on sen huono sähkönjohtavuus. Alumiinin oksidikerros havainnollistettuna kuviossa 13.



Kuvio 13. Alumiinin oksidikerros.

4.2 Kupari

Kupari on punertavan ruskea metalli, joka on sähköä johtavaa, kestävä, työstettävää, sitkeää ja antibakteerista. Kuparin ominaisuuksia voidaan muokata seostamalla tai valmistusmenetelmää vaihtamalla. Valtaosa kuparista käytetään rakennusteollisuuteen ja elektroniikkateollisuuteen. Muita käyttökohteita ovat mm. ajoneuvoteollisuus, kulutustuotteet ja teollisuuskoneet. Kupari johtaa sähköä erittäin hyvin ja onkin yksi parhaimpia sähkönjohteita. Johtokykynsä ansiosta

puhdasta kuparia käytetään yleisesti sähköjohdoissa ja elektroniikassa. Kuparit ovat työstettäviä, ei-magneettisia, näyttävän näköisiä sekä kuparilla on hyvä korroosionkesto. Kuparilla on hyvä lämmönjohtokyky sekä antibakteerisia ominaisuuksia.

Voimakkaasti seostettuna kuparin sähkönjohtokyky huononee, mutta lujuus kasvaa. Kuparimetalleja voidaan myös muokkauslujittaa ja lämpökäsitellä. Kupariseoksilla on yleisesti hyvä työstettävyys ja niitä voidaan mm. valaa, kylmämuokata, kuumamuokata, lastuta, hitsata, juottaa, valssata, pursottaa ja 3D-tulostaa. Kuparin ominaisuuksia voidaan muokata seostamalla tai valmistusmenetelmää vaihtamalla. /10/

4.3 Galvaaninen korrosio

Galvaanisessa korroosiossa on kaksi eri metalliseosta samassa elektrolyytissä tai ne on liitetty yhteen. Koostumukseltaan erilaisten metallien välillä on jalousero, jolloin epäjalompi metalli syöpyy. Jalompi metalli säilyy ehjänä samalla nopeuttaen epäjalomman metallin syöppymistä. Galvaaninen korrosio rajoittuu erilaisten metallien kosketuskohdan läheisyyteen. /11/

Muuntajissa galvaaninen korrosio ehkäistään muuntajaöljyllä sekä pinnoittamalla kuparikisko tinalla. Tinatun kuparikiskon ollessa kosketuksessa alumiinin kanssa muuntajaöljyssä, ei galvaanista korroosiota pääse syntymään.

5 STANDARDI IEC 61238-1-1

Tässä työssä tehty virtakiskojen liitosten vanhenemiskoe on tehty osaksi IEC 61238-1-1 standardin mukaan. IEC 61238-1-1 on kansainvälinen standardi, joka keskittyy kaapeleiden puristus- ja mekaanisten liitosten testaamiseen. Tämä standardi kattaa kaapeleiden jännitteet 1 kV saakka. /12/

5.1 Standardin mukaiset raja-arvot

Standardin läpäisyyn vaativat raja-arvot ovat alkuperäinen hajonta δ , keskiarvon hajonta β , muutos resistanssin kertoimessa D , resistanssin kertoimen suhde λ ja enimmäislämpötilat θ_{MAX} . Nämä raja-arvot ovat laskettavissa mitatuista arvoista jännite U ja virta I . Arvot esitetään pistekaaviossa standardin mukaan. /12/ Standardin mukaiset raja-arvot taulukossa 3.

Taulukko 3. Standardin mukaiset raja-arvot.

Parameter	Designation	Text reference	Maximum value
Initial scatter	δ	Clause F.4	0,30
Mean scatter	β	Clause F.5	0,30
Change in resistance factor	D	Clause F.6	0,15
Resistance factor ratio	λ	Clause F.7	2,0
Maximum temperature	θ_{max}	Clause F.8	θ_{ref}

NOTE Specified values are based on experience.

5.1.1 Alkuperäinen hajonta δ pistekaaviossa

Hajonta eri liitosten välillä kokeen alussa. Alkuperäinen hajonta δ lasketaan standardin mukaan seuraavalla tavalla:

Ensin lasketaan keskiarvo kaavalla:

$$\underline{K}_0 = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 k_0$$

Kaava 1. Keskiarvo kokeen alussa.

jossa k_0 on kokeen alussa saatu 0 syklin arvo.

Sitten lasketaan keskihajonta kaavalla: $s_0 = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_1^6 (k_0 - \underline{K}_0)^2}$

Kaava 2. Keskihajonta kokeen alussa.

Lopuksi alkuperäinen hajonta: $\delta = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{s_0}{\underline{K}_0} t_s$

Kaava 3. Alkuperäinen hajonta.

jossa $t_s =$ Studentin t-jakauma: $t_s = t_{5;0,995} = 4,032$

/12/

5.1.2 Keskiarvon hajonta β pistekaaviossa

Standardin mukaan keskiarvon hajonta β määritetään mittaamalla jännitteen U ja virran I arvot 250 syklin jälkeen 75 syklin välein aina 1000 sykliin saakka ± 10 syklin toleranssilla. Tällöin saadaan yhteensä 11 mittaustulosta per liitos. Tällöin muuttuja x saa arvot -5, -4, -3 ... +5.

Jokaiselle liitokselle lasketaan keskiarvo välillä $x = -5 \dots +5$ kaavalla:

$$\underline{k} = \frac{1}{11} \sum_{-5}^{+5} k$$

Kaava 4. Keskiarvo välillä $x = -5 \dots +5$.

Näiden kuuden arvon keskiarvo on silloin: $\underline{K} = \frac{1}{6} \sum_1^6 \underline{k}$

Kaava 5. Keskiarvo.

Lasketaan keskihajonta: $s = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_1^6 (\underline{k} - \underline{K})^2}$

Kaava 6. Keskihajonta.

Ja lopuksi keskiarvon hajonta: $\beta = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{s}{\underline{K}} t_s$

Kaava 7. Keskiarvon hajonta.

jossa $t_s = 4,032$ kuten aiemmin. /12/

5.1.3 Muutos resistanssin kertoimessa D

Jotta voidaan laskea mahdollinen muutos resistanssin kertoimessa viimeisten 11 mittauksen yli, käytetään pienimmän neliösumman menetelmää parhaiten sopivan viivan määrittämiseksi.

Parhaiten sopiva viiva lasketaan kaavalla:
$$b = \frac{\sum_{-5}^{+5} xk}{\sum_{-5}^{+5} x^2}$$

Kaava 8. Parhaiten sopiva viiva.

Täten yksikkökohtainen muutos resistanssin kertoimessa on:

$$M = 10 \frac{b}{\underline{k}}$$

Kaava 9. Yksikkökohtainen muutos resistanssin kertoimessa.

jossa \underline{k} :n arvo on aiemmin kaavasta X saatu arvo.

Luottamusväli resistanssin kertoimessa lasketaan kaavalla:
$$\delta_i = t_s \sigma$$

Kaava 10. Luottamusväli resistanssin kertoimessa.

jossa $t_s =$ Studentin t-jakauma:
$$t_s = t_{9;0,95} = 1,833$$

ja $\sigma =$ arvioitu keskivirhe parhaiten sopivasta viivasta muuttujan x arvoilla +5 tai -5.

Voidaan havaita σ olevan 11 mittauspisteellä:
$$\sigma = 0,564 \sqrt{\sum_{-5}^{+5} \frac{(k - k - bx)^2}{9}}$$

$$\sigma = 0,564s_j$$

Kaava 11. Arvioitu keskivirhe.

jossa s_j on liitoksen keskihajonta parhaiten sopivasta viivasta.

Kokonainen yksikkökohtainen hajonta parhaiten sopivasta viivasta on silloin:

$$S = \frac{2t_s\sigma}{\underline{k}}$$

Kaava 12. Yksikkökohtainen hajonta.

Muuttuja S arvioidaan jokaiselle kuudelle liitokselle.

Lopuksi muutos resistanssin kertoimelle D :

$$D = |M| + S$$

Kaava 13. Muutos resistanssin kertoimelle.

/12/

5.1.4 Resistanssin kertoimen suhde λ

Resistanssin kertoimen suhde lasketaan kaavalla: $\lambda = \frac{k}{k_0}$

Kaava 14. Resistanssin kertoimen suhde.

jossa:

k on liitoksen resistanssin kerroin jokaiselle liitokselle missä mittauspisteessä vaan.

k_0 on saman liitoksen resistanssin kerroin syklin numero 0 kohdalla. /12/

5.1.5 Enimmäislämpötilat θ_{MAX}

Jokaiselle liitokselle θ_{MAX} arvo mitataan. Tämä on enimmäislämpötila, jonka liitos saavuttaa kokeen aikana. Samanaikaisesti lämpötilan referenssiarvo θ_{ref} tulee myös mitata. /12/

6 TUTKITTAVAT LIITOKSET

Tutkittavia kiskoliitoksia oli yhteensä 18 kappaletta. Tutkimuksessa haluttiin tutkia eri karhennuksien sekä erilaisen pultin vastakappaleen vaikutusta liitoksissa. Kaikissa liitoksissa käytettiin M16-teräspulttia. Taulukossa 4 on listattuna kaikkien liitosten karhennukset sekä vastakappaleet.

Taulukko 4. Tutkittavat liitokset ja niiden järjestys mittauskokoontenossa.

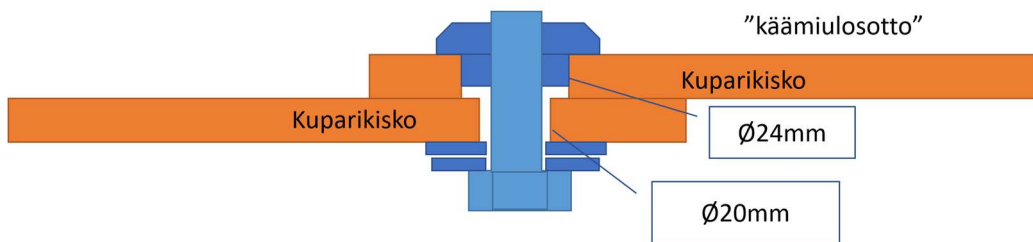
Mittausjärjestysnumero	Liitostyyppi (Type)	Karhennustyyli	Vastakappale (mutteri)
1	6	A	Nyloc
2	5	A	Teräs (normaali)
3	4	A	Niitti
4	3	A	Teräs (normaali)
5	2	A	Niitti
6	1	-	Niitti
7	1	-	Niitti
8	2	B	Niitti
9	3	B	Teräs (normaali)
10	4	B	Niitti
11	5	B	Teräs (normaali)
12	6	B	Nyloc
13	6	C	Nyloc
14	5	C	Teräs (normaali)
15	4	C	Niitti
16	3	C	Teräs (normaali)
17	2	C	Niitti
18	1	-	Niitti

6.1 Liitostyypit

Erilaiset liitokset on nimetty liitostyyppin mukaan Type 1, Type 2, Type 3, Type 4, Type 5 ja Type 6. Erilaiset liitostyypit simuloivat erilaisia mahdollisia liitoksia muuntajassa. Jokainen liitos kiristettiin käyttäen yhtä M16-teräspulttia, sekä vaihtuvaa vastakappaleita.

6.1.1 Type 1

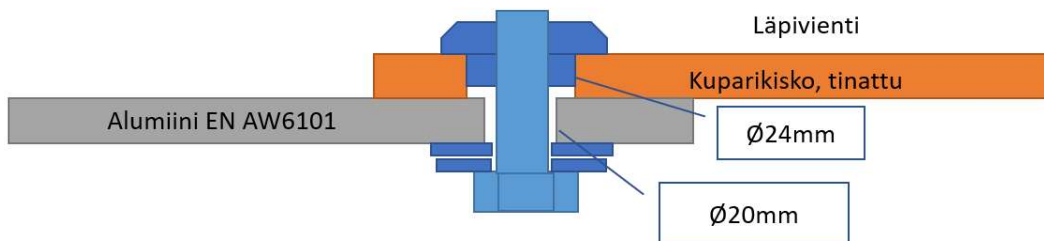
Ensimmäinen liitostyyppi on kahden kuparikiskon välinen liitos, jossa vastakappaleena on niittimutteri. Liitos Type 1 simuloi muuntajassa käämin ja kiskotuksen välistä pulttiliitosta. Liitos Type 1 esitettyinä kuviossa 14.



Kuvio 14. Type 1 liitos.

6.1.2 Type 2

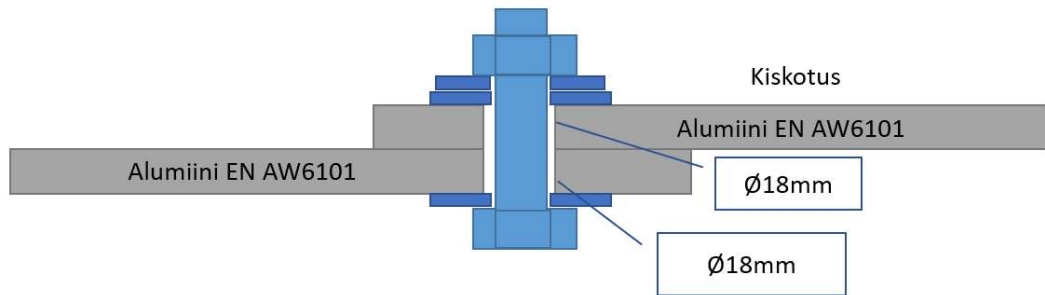
Toinen liitostyyppi on tinatun kuparikiskon ja alumiinikiskon välinen pulttiliitos, jossa vastakappaleena on niittimutteri. Liitos Type 2 simuloi muuntajassa kiskotuksen ja läpiviennin välistä pulttiliitosta. Liitos Type 2 esitettyinä kuviossa 15.



Kuvio 15. Type 2 liitos.

6.1.3 Type 3

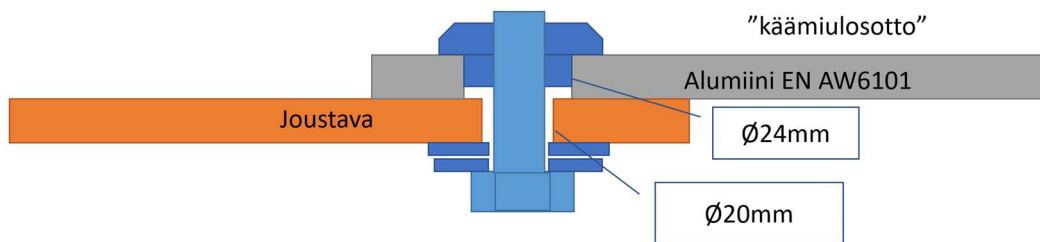
Kolmas liitostyyppi on kahden alumiinikiskon välinen pulttiliitos, jossa vastakappaleena on teräsmutteri. Liitos Type 3 simuloi muuntajassa kiskotuksen välistä pulttiliitosta. Liitos Type 3 esitettynä kuviossa 16.



Kuvio 16. Type 3 liitos.

6.1.4 Type 4

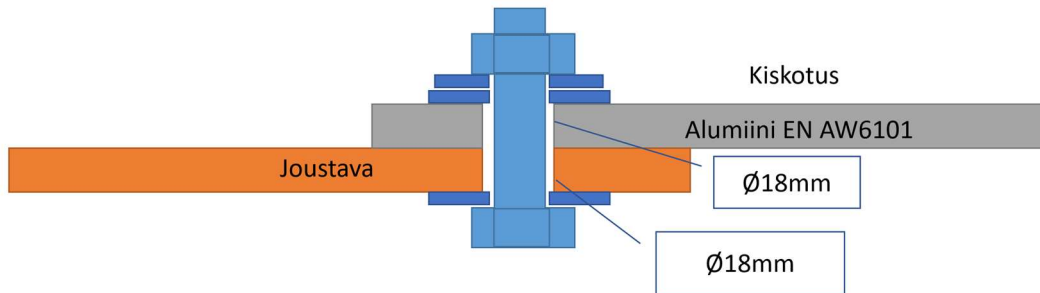
Neljäs liitostyyppi on alumiinikiskon ja joustavan kuparikiskon välinen pulttiliitos, jossa vastakappaleena on niittimutteri. Liitos Type 4 simuloi muuntajassa käämin ja joustavan kiskon välistä pulttiliitosta. Liitos Type 4 esitettynä kuviossa 17.



Kuvio 17. Type 4 liitos.

6.1.5 Type 5

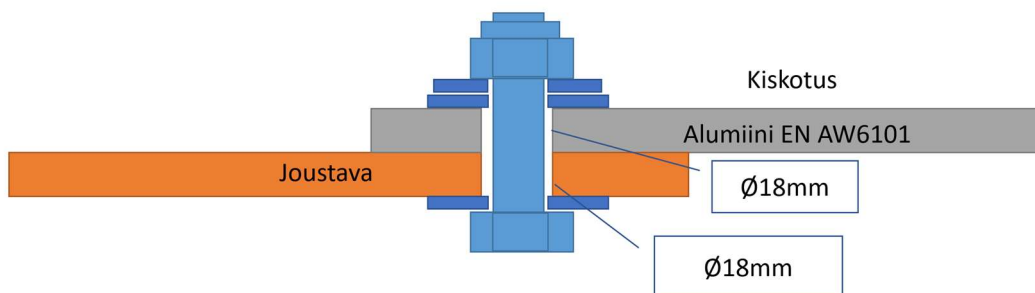
Viides liitostyyppi on joustavan kuparikiskon ja alumiinikiskon välinen pulttiliitos, jossa vastakappaleena on teräsmutteri. Liitos Type 5 simuloi muuntajassa joustavan kiskon ja kiskotuksen välistä pulttiliitosta. Liitos Type 5 esitettynä kuviossa 18.



Kuvio 18. Type 5 liitos.

6.1.6 Type 6

Kuudes ja viimeinen liitostyyppi on alumiinikiskon ja joustavan kuparikiskon välinen pulttiliitos, jossa vastakappaleena on nyloc-mutteri. Liitos Type 6 simuloi Type 5:n tapaan joustavan kiskon ja kiskotuksen välistä liitosta. Erona Type 5 -liitokseen on vastakappaleena toimiva nyloc-mutteri. Liitos Type 6 esitettynä kuviossa 19.



Kuvio 19. Type 6 liitos.

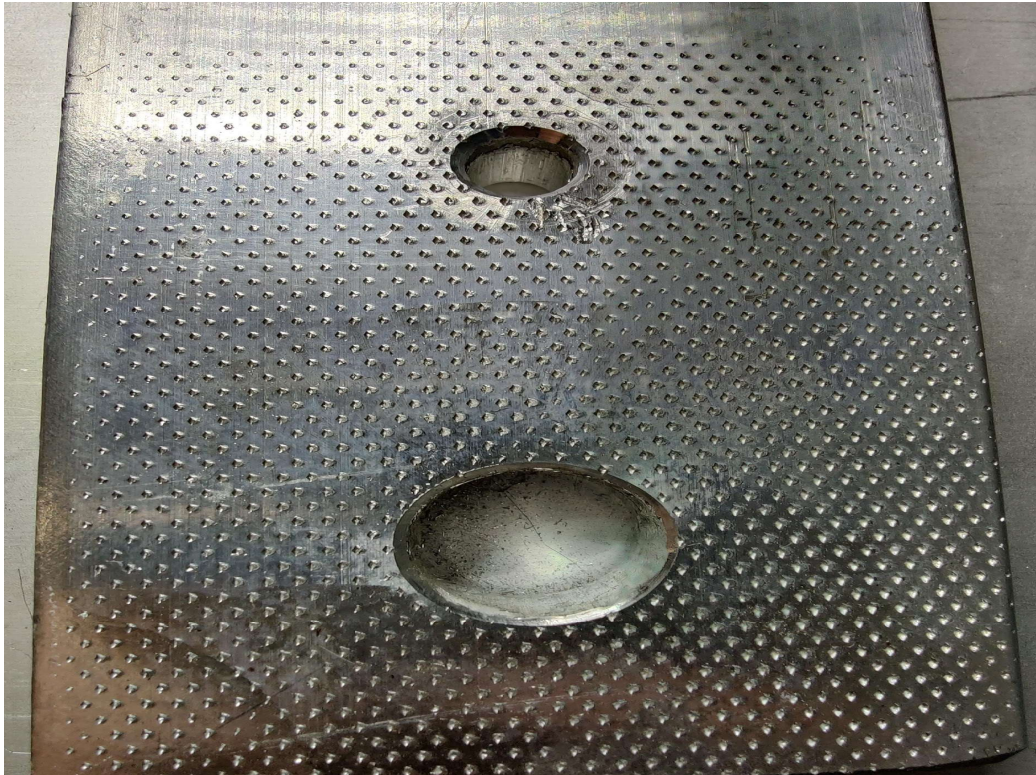
6.2 Alumiinikiskojen karhennukset

Alumiinikiskot karhennetaan, eli kiskoon tehdään terävät kohoumat siihen tarkoitettulla puristustyökalulla. Tällöin alumiinikiskon liitospinnasta saadaan epätasainen ja puristettaessa toista kiskoa vasten, oksidikerros rikkoutuu. Oksidikerros on tärkeää saada rikki sen huonon sähkönjohtavuuden vuoksi. Huono sähkönjohtavuus liitoksessa johtaa kasvaneeseen resistanssiin, joka taas johtaa liitoksen lämpenemiseen ja saattaa näin vaurioittaa eristeitä. Lämpenemisestä syntyy myös hukkaenergiaa, joka johtaa muuntajassa huonoon hyötysuhteeseen.

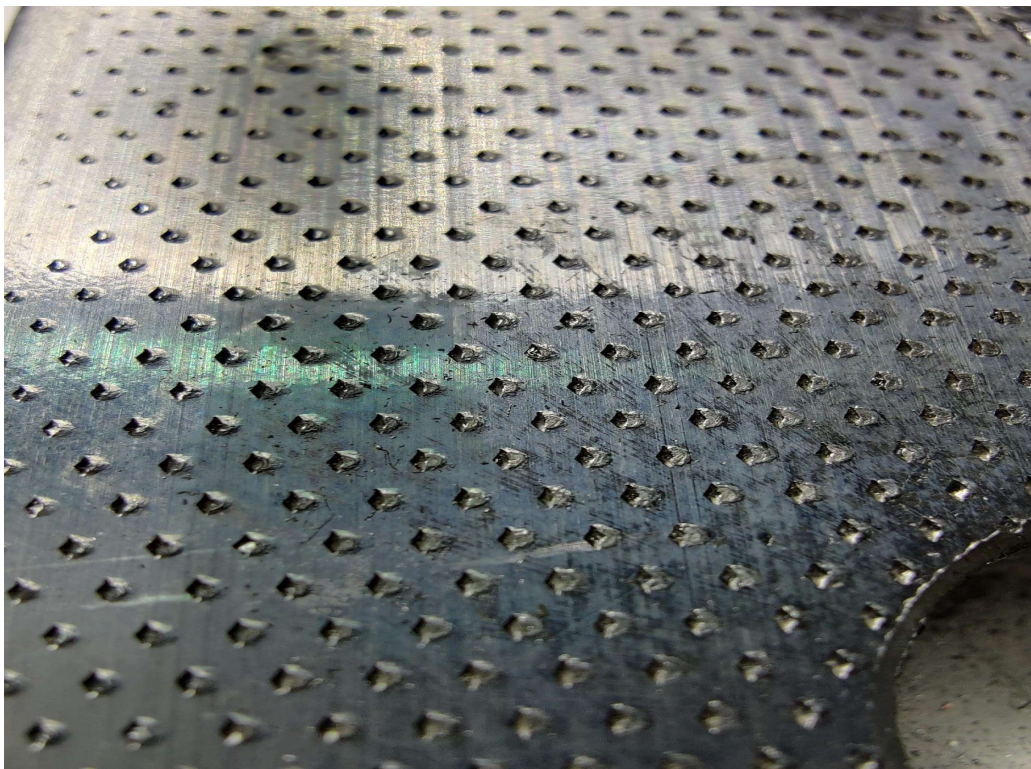
Jokaista karhennustyyliä käytettiin tutkimuksessa kerran liitoksissa Type 2 – Type 6. Liitoksessa Type 1 ei käytetty karhennusta, sillä se oli kahden kuparikiskon välinen pulttiliitos, jolloin karhennusta ei tarvita.

6.2.1 Karhennustyyli A

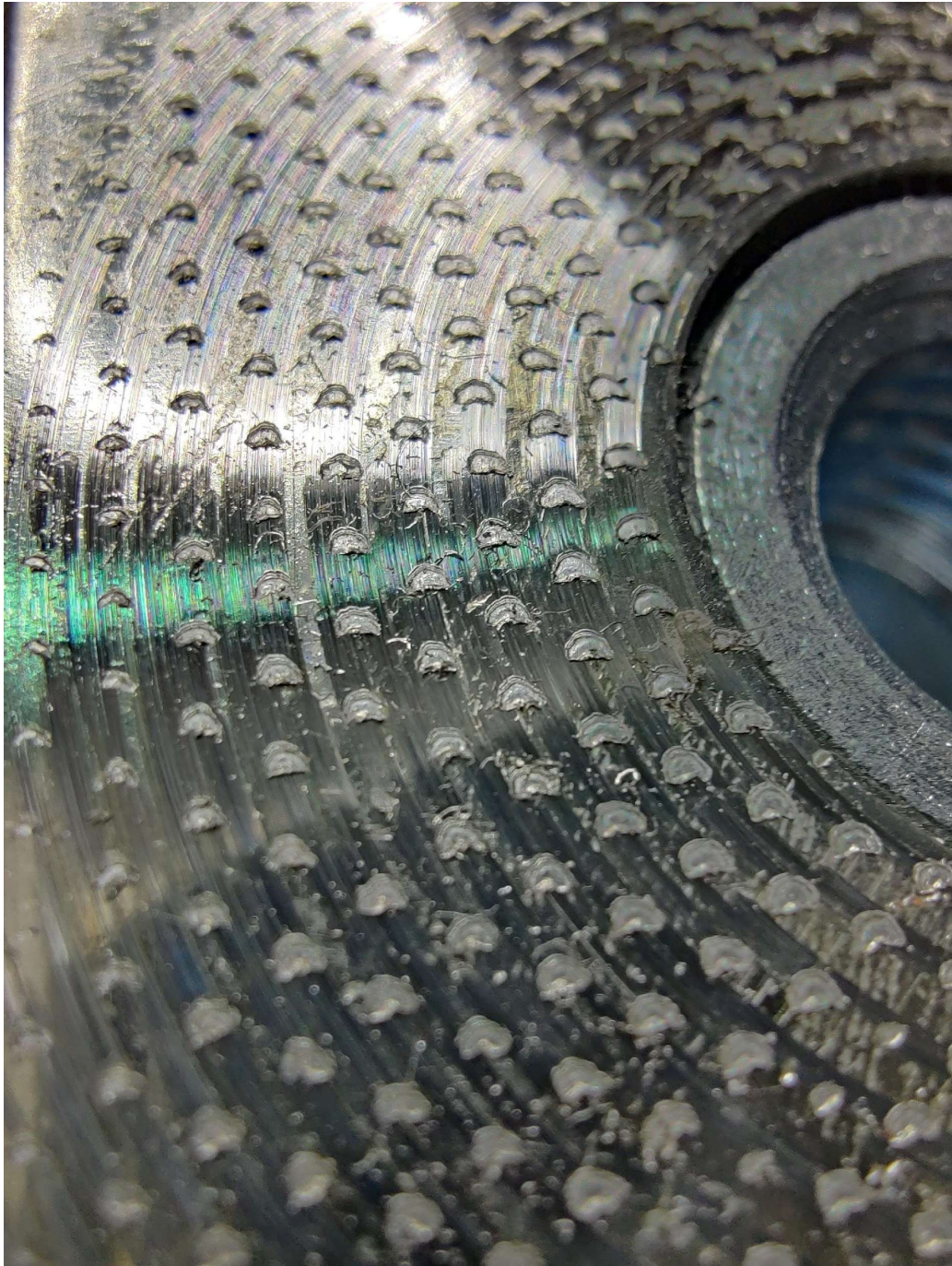
Karhennustyyliä A on käytetty alkuperäistä, jo toimivaksi todettua karhennustyyliä. Tämä karhennustyyli toimi vertaus pohjana muille karhennustyyliille. Karhennustyyliä A kohoumat puristetaan niin sanotusti salmiakkimuotoon. Kuvioissa 20 ja 21 on esitetty karhennustyökalun jättämä jälki alumiinikiskoon, kun kiskot karhennetaan tyylillä A. Kuviossa 22 karhennuksesta johtuvat jäljet kuparikiskossa.



Kuvio 20. Karhennustyyli A.



Kuvio 21. Karhennustyyli A läheltä.



Kuvio 22. Karhennustyylin A tekemä jälki kuparikiskoon.

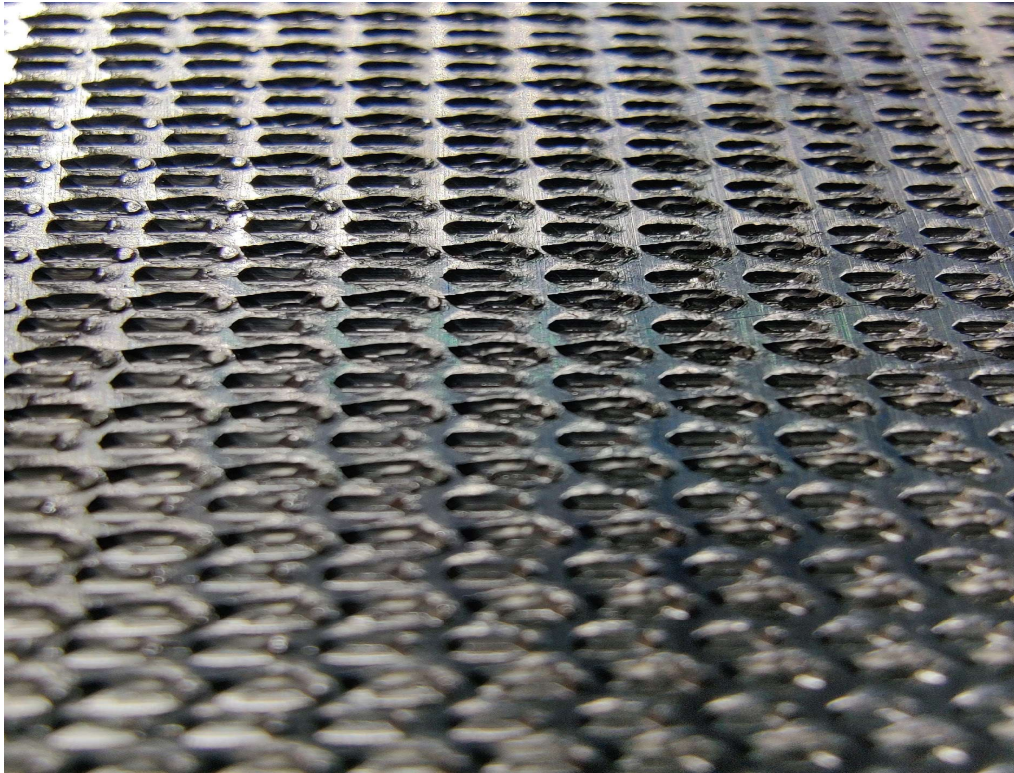
Kuvion 22 liitoksessa toinen kiskoista oli päässyt hieman pyörhtämään, minkä seurauksena kuparikiskoon oli tullut pyöreä jälki.

6.2.2 Karhennustyyli B

Karhennustyyli B on niin sanottu välimalli, joka on puristettu kuusi kertaa. Kohoumien tekemiseen on käytetty vanhaa, karhennustyyliässä A käytettyä työkalua, sekä uutta, karhennustyyliässä C käytettyä työkalua. Kuvioissa 23 ja 24 on esitetty karhennustyökalun jättämä jälki alumiinikiskoon, kun kiskot karhennetaan tyyliillä B. Kuviossa 25 karhennuksesta johtuvat jäljet kuparikiskossa.



Kuvio 23. Karhennustyyli B.



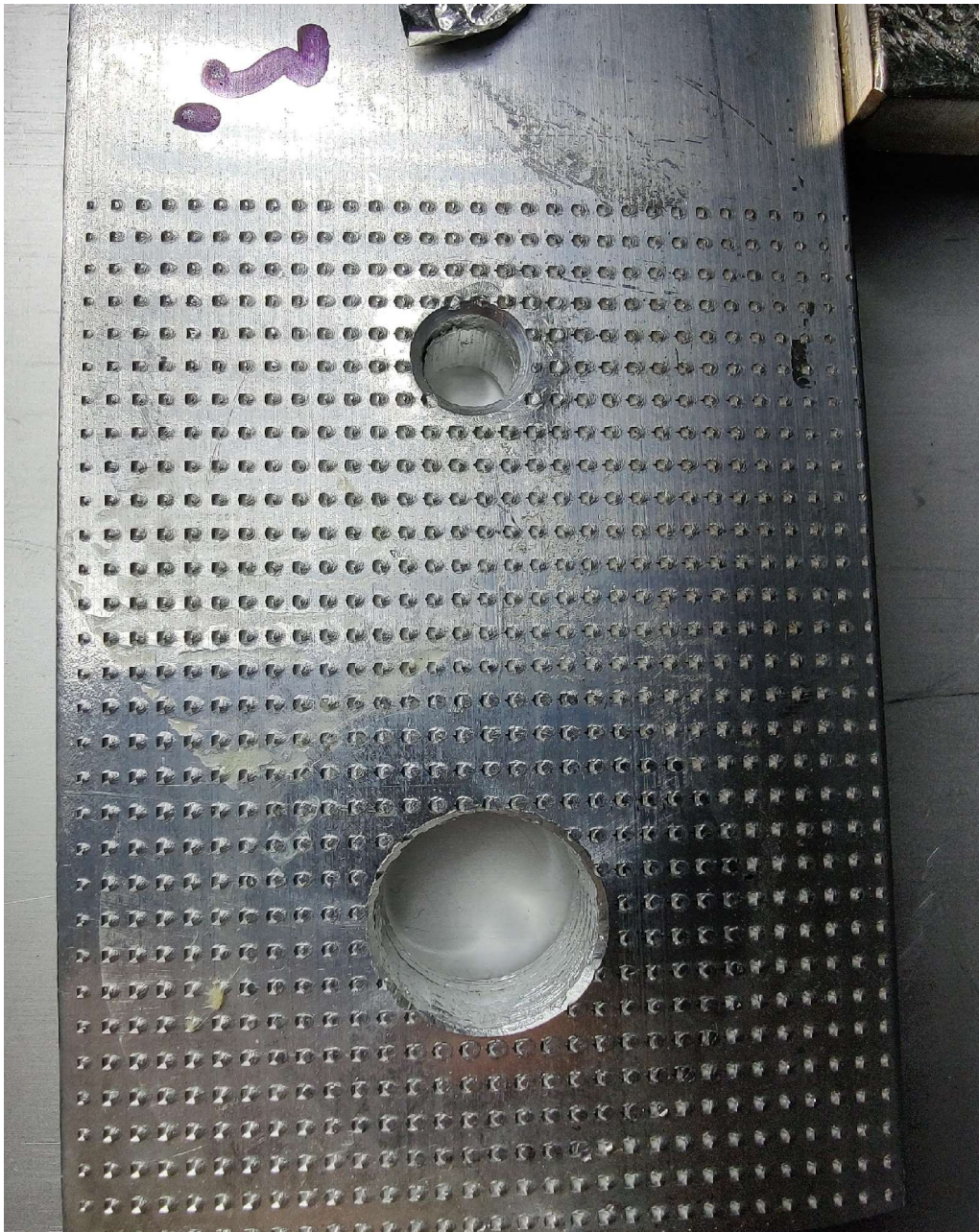
Kuvio 24. Karhennustyyli B läheltä.



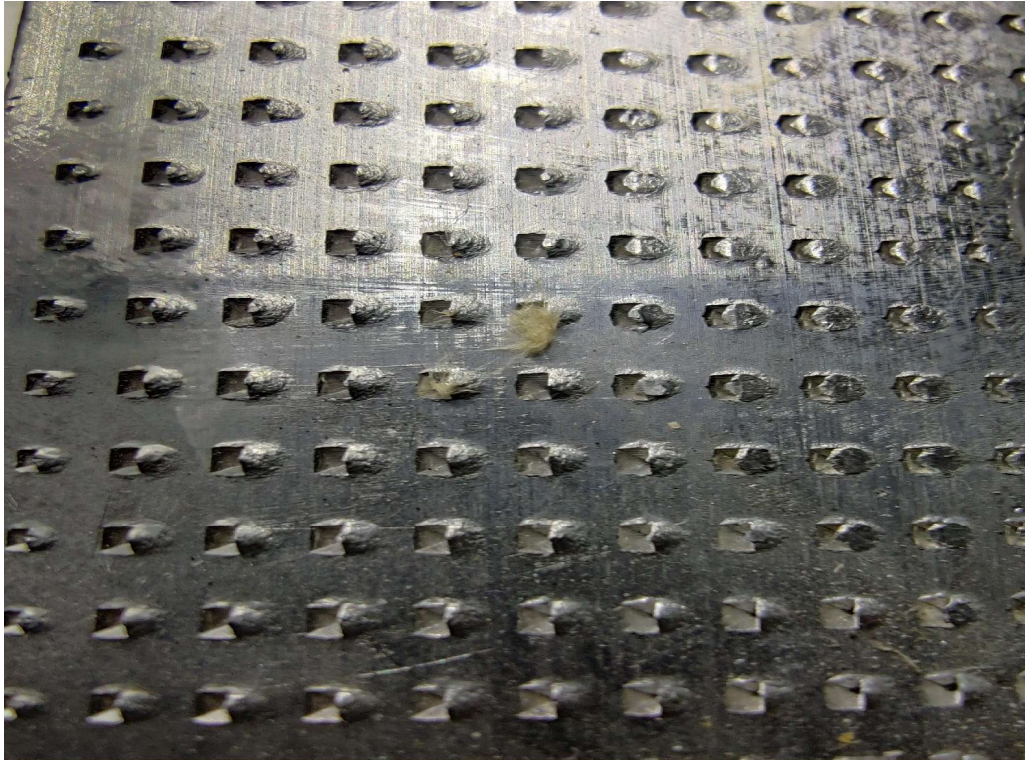
Kuvio 25. Karhennustyylin B tekemä jälki kuparikiskoon.

6.2.3 Karhennustyyli C

Karhennustyyli C on käytetty uutta karhennustyökalua. Uusi työkalu puristaa kohoumat karhennustyylistä A, eli vanhasta työkalusta poiketen lineaarisesti riviin. Kuvioissa 26 ja 27 on esitetty karhennustyökalun jättämä jälki alumiinikiskoon, kun kiskot karhennetaan tyylillä C. Kuviossa 28 karhennuksesta johtuvat jäljet kuparikiskossa.



Kuvio 26. Karhennustyyli C.



Kuvio 27. Karhennustyyli C läheltä.

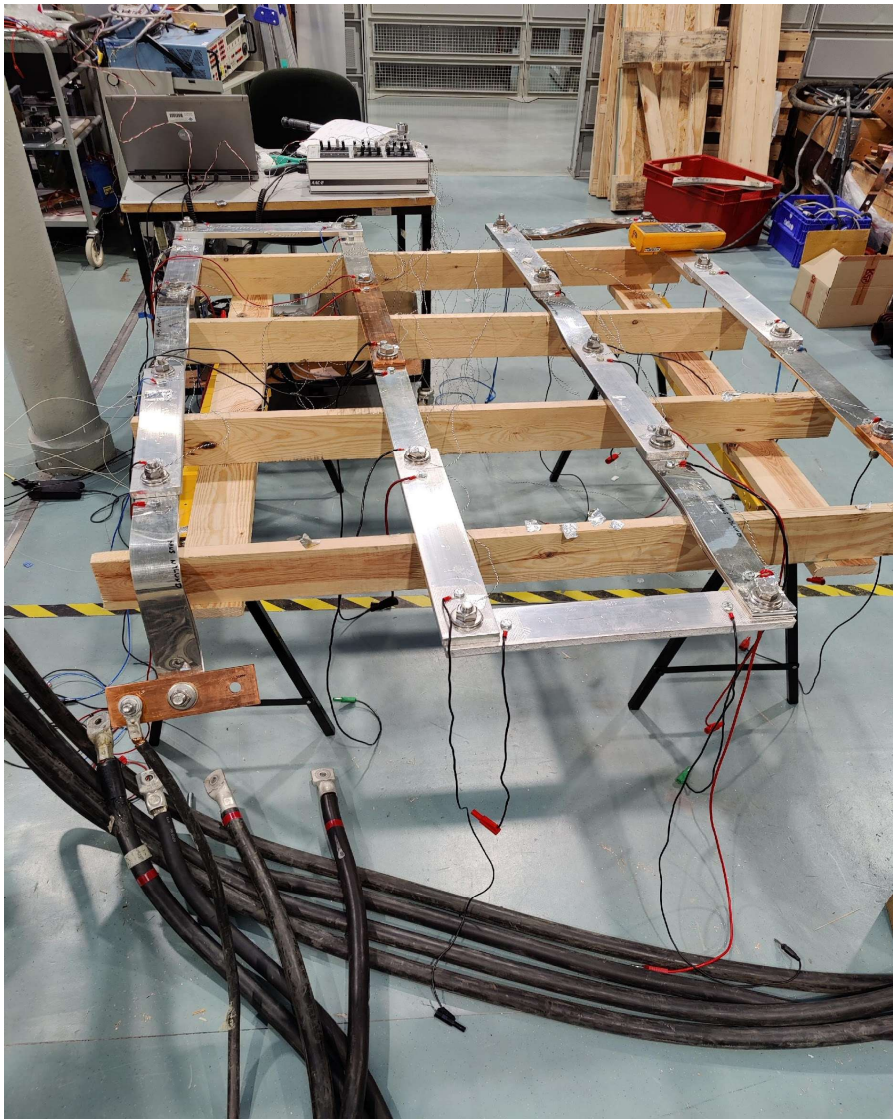


Kuvio 28. Karhennustyylin C tekemä jälki kuparikiskoon.

7 MITTAUSLAITTEISTO

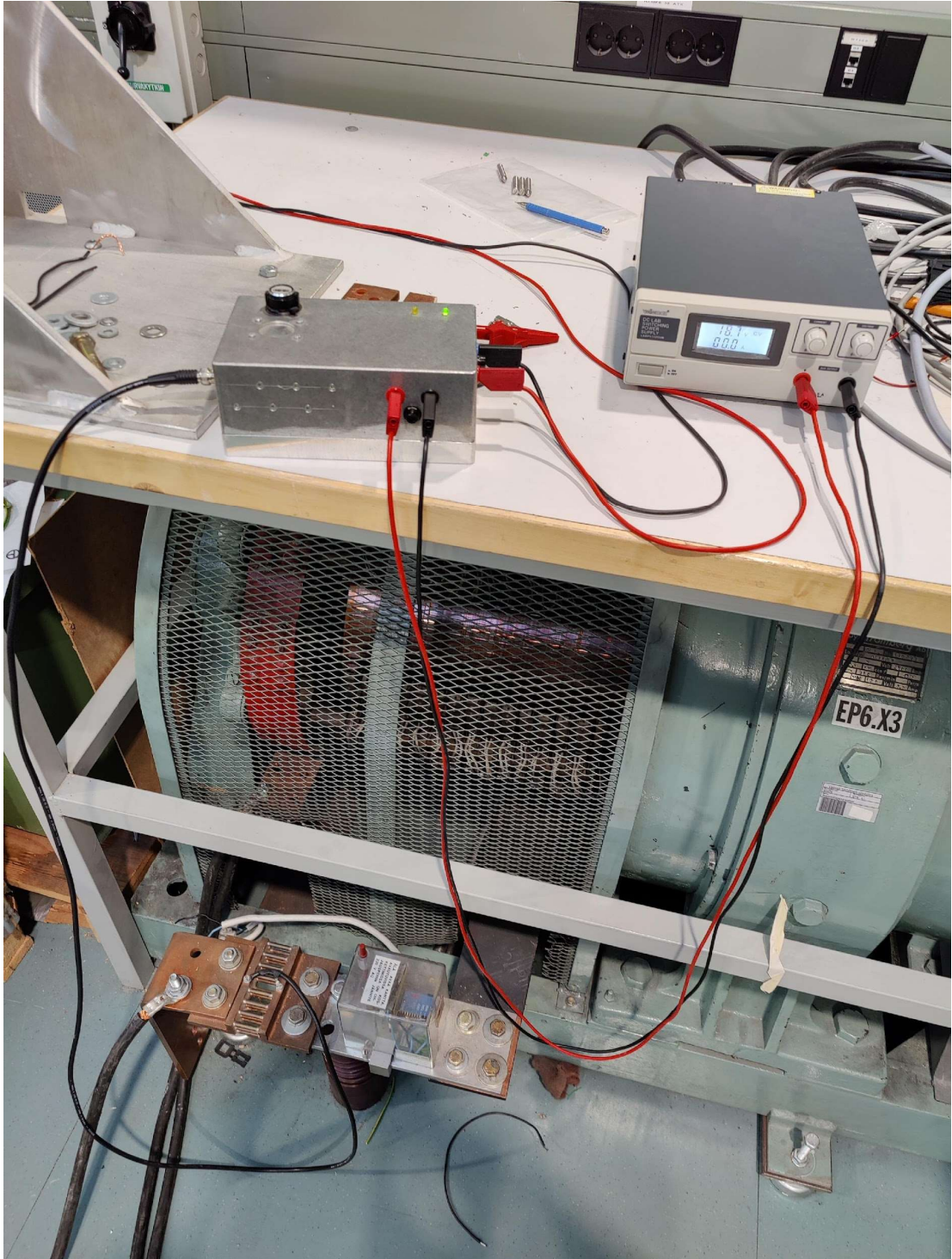
Mittauslaitteisto koostui Vaasan Technobothnian laboratorion laitteista. Mittauskoonpano suunniteltiin Creo 4.0 3D-ohjelmalla.

Mittauskoonpanossa eri kiskot oli liitetty sarjaan saavuttaen halutut liitostyytit. Kiskoihin porattiin pulttiliitosta varten tarvittavien reikien lisäksi 8 mm reiät, joihin voitiin kiinnittää yleismittariin kytkettävät kaapelit jännitemittauksia varten. Lämpötila-anturit kiinnitettiin liitoskohtiin alumiiniteipillä. Kuviossa 29 mittauskoonpano.



Kuvio 29. Mittauskoonpano.

Suurtehgeneraattorilla saatiin syötettyä mittauskokoontaan 190–200 A virta, mutta pieni, vain 0,5–1 mV tasajännite. Kuviossa 30 suurtehgeneraattori.



Kuvio 30. Suurtehgeneraattori.

Mittauskokoonpanon virta mitattiin suurtehogeneraattorilta tulevasta syöttökaapelista pihtivirtamittarilla, joka on kuviossa 31.



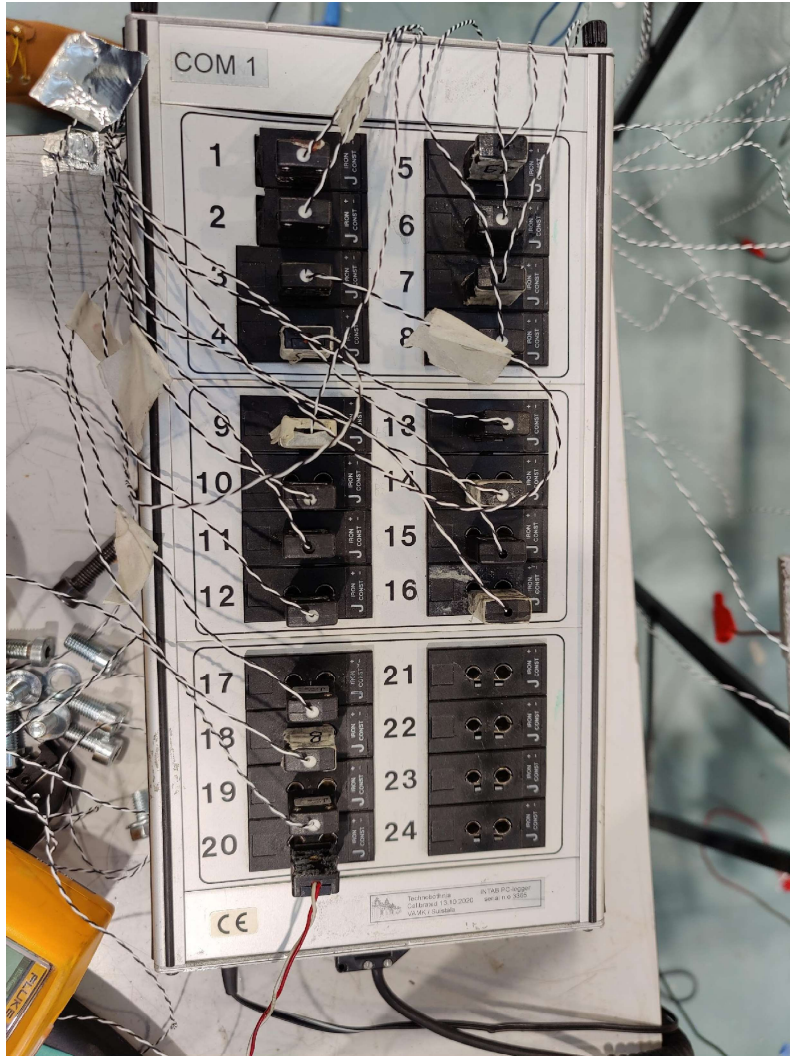
Kuvio 31. Hioki 3284 pihtivirtamittari.

Jokaisen liitoksen yli vaikuttava jännite mitattiin yleismittarilla, joka on kuviossa 32.



Kuvio 32. Fluke 289 True RMS Multimeter -yleismittari.

Liitoskohtien lämpötilat tuotiin automaattisesti tietokoneelle INTAB PC-loggerin avulla. Tietokoneella oleva ohjelma pystyi saatujen lämpötila arvojen avulla pyörittämään syklikoetta automaattisesti. INTAB PC-logger kuviossa 33.



Kuvio 33. INTAB PC-logger

8 TUTKIMUSTULOKSET

Mittaukset suoritettiin viisi kertaa. Ensimmäinen mittaus tehtiin tutkimuksen alussa, kun rasiusta liitoksille ei ollut tullut. Seuraava mittaus suoritettiin 264 syklin kohdalla, kun noin 1/4 kokeesta oli suoritettu. Kolmas mittaus tehtiin noin puolessa välissä, tarkemmin 613 syklin kohdalla. Neljäs ja viides mittaus tehtiin kokeen loputtua, 1015 syklin kohdalla. Viides mittaus tehtiin vuorokausi neljännen mittauksen jälkeen, jotta voitiin karsia pois inhimillinen erehdys.

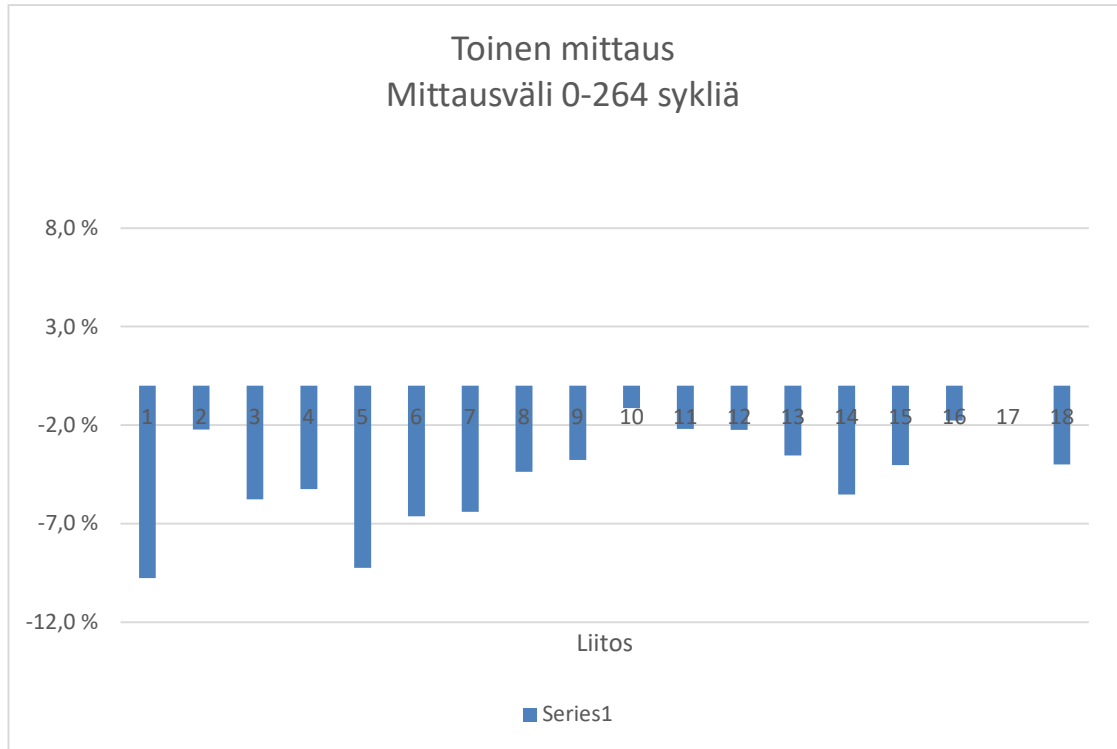
Mitattuja suureita ovat virta I ja jännite U . Virta mitattiin mittauskokoontanao syöttävästä kaapelista Hioki 3284 pihtivirtamittarilla ja jännite mitattiin jokaisen liitoksen yli Fluke 289 -yleismittarilla. Resistansseilla $R1-R5$ viitataan eri mittauskerroilla saatuihin tuloksiin, ja ne on laskettu mitatuista arvoista kaavalla $R = U/I$.

8.1 Ensimmäinen mittaus

Ensimmäinen mittaus suoritettiin kokeen alussa, jotta saimme selville liitosresistanssit ennen vanhenemiskokeen aloittamista. Ensimmäiset mittaustulokset on taulukoituna liitteessä 1.

8.2 Toinen mittaus

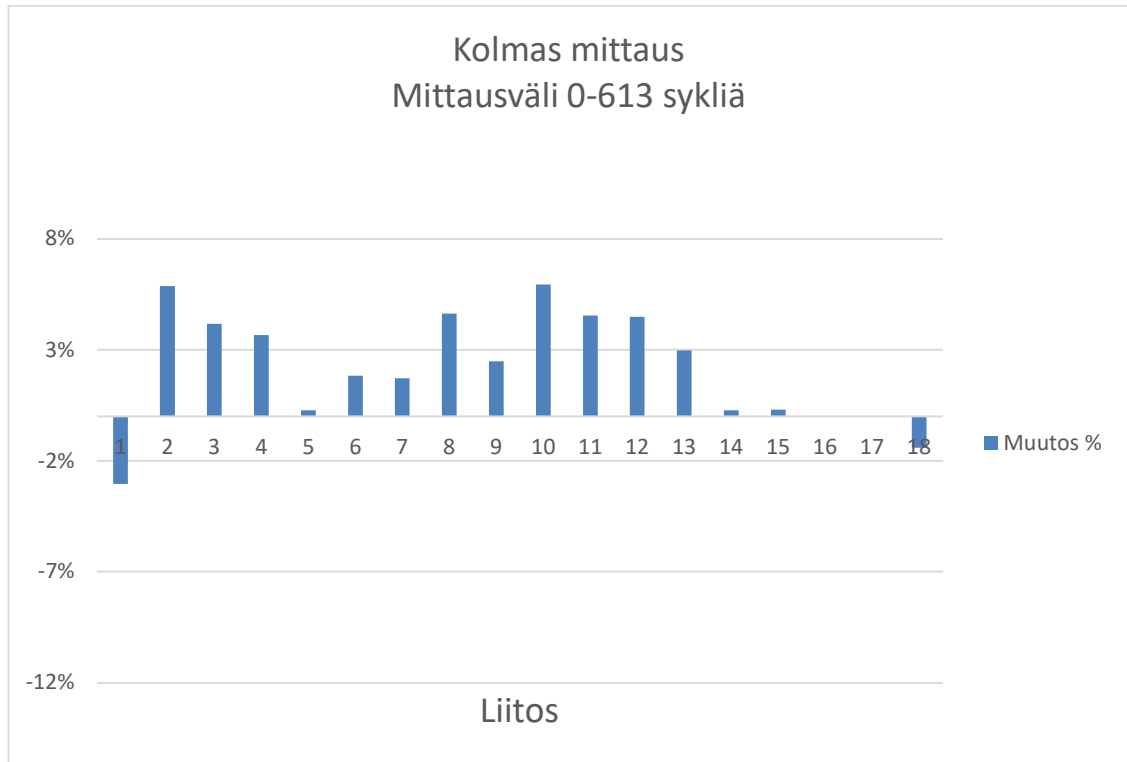
Toinen mittaus suoritettiin 264 syklin kohdalla. Toisen mittauksen mittaustulokset kuviossa 34.



Kuvio 34. Liitosresistanssin muutos prosentteina lähtötilanteesta.

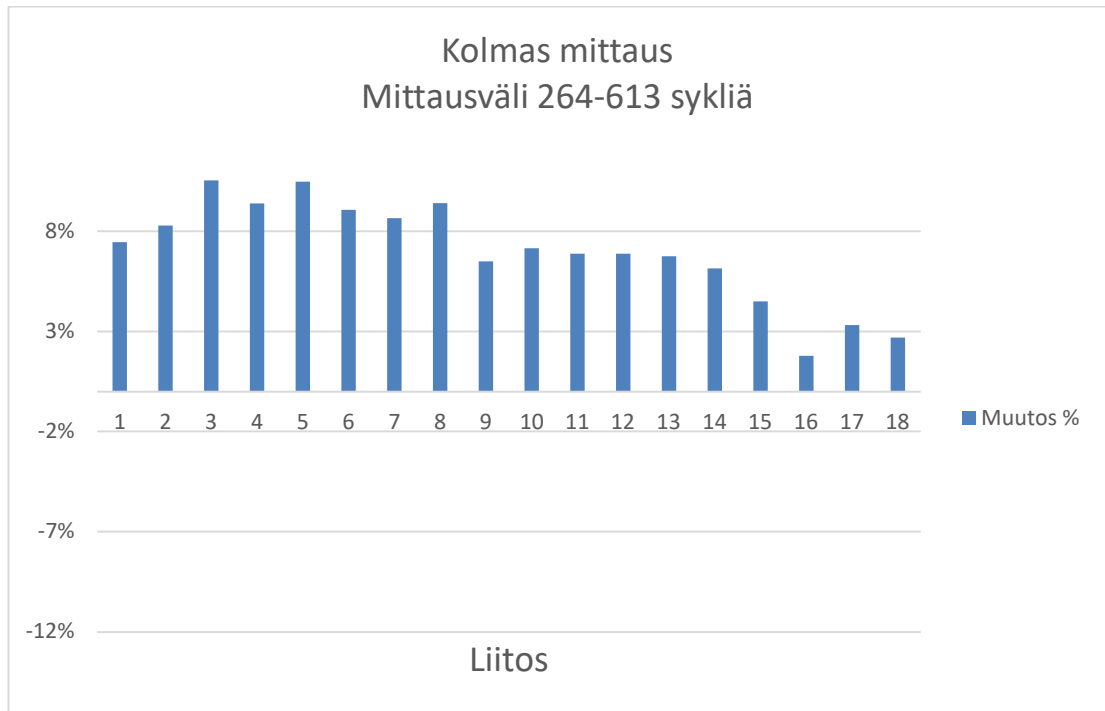
8.3 Kolmas mittaus

Kolmas mittaus 613 syklin kohdalla. Muutos prosentteina lähtötilanteesta kuviossa 35.



Kuvio 35. Liitosresistanssin muutos prosentteina lähtötilanteesta.

Kuviossa 36 muutos edelliseen mittaukseen verrattuna.

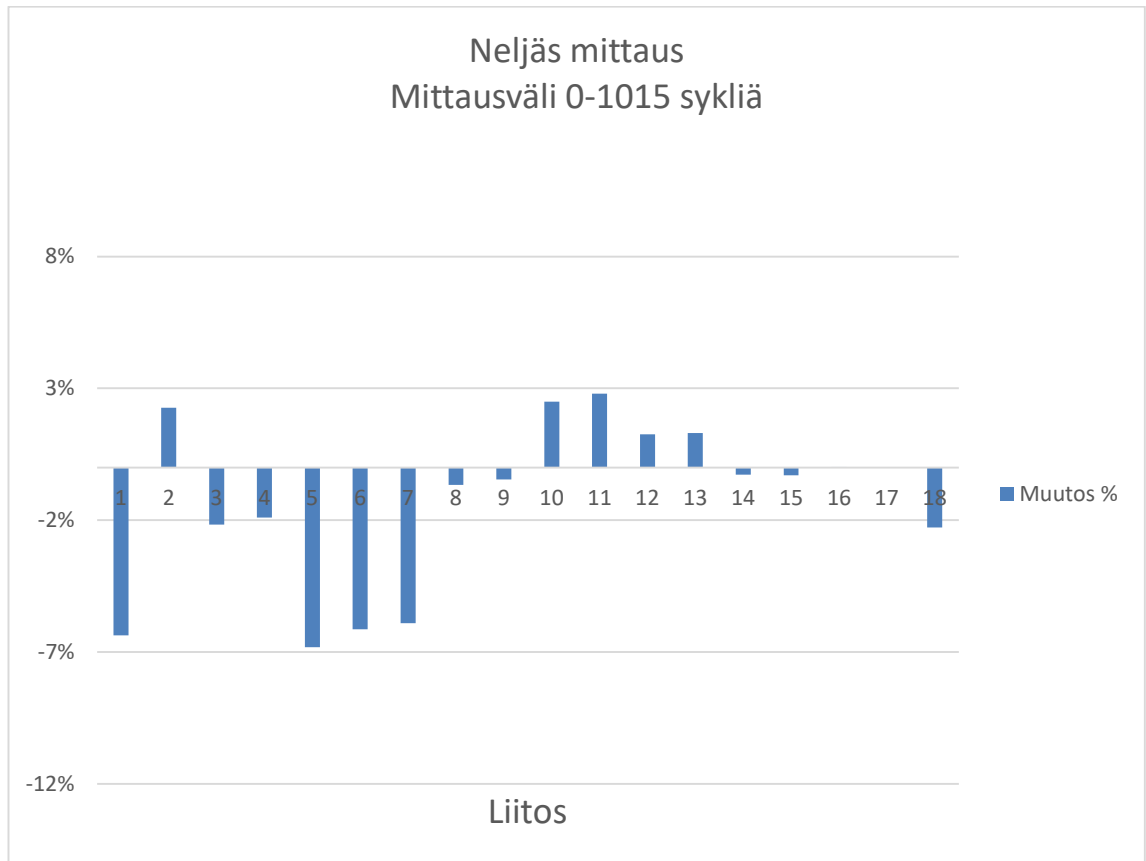


Kuvio 36. Liitosresistanssin muutos prosentteina edelliseen mittaukseen verrattuna.

8.4 Neljäs ja viides mittaus

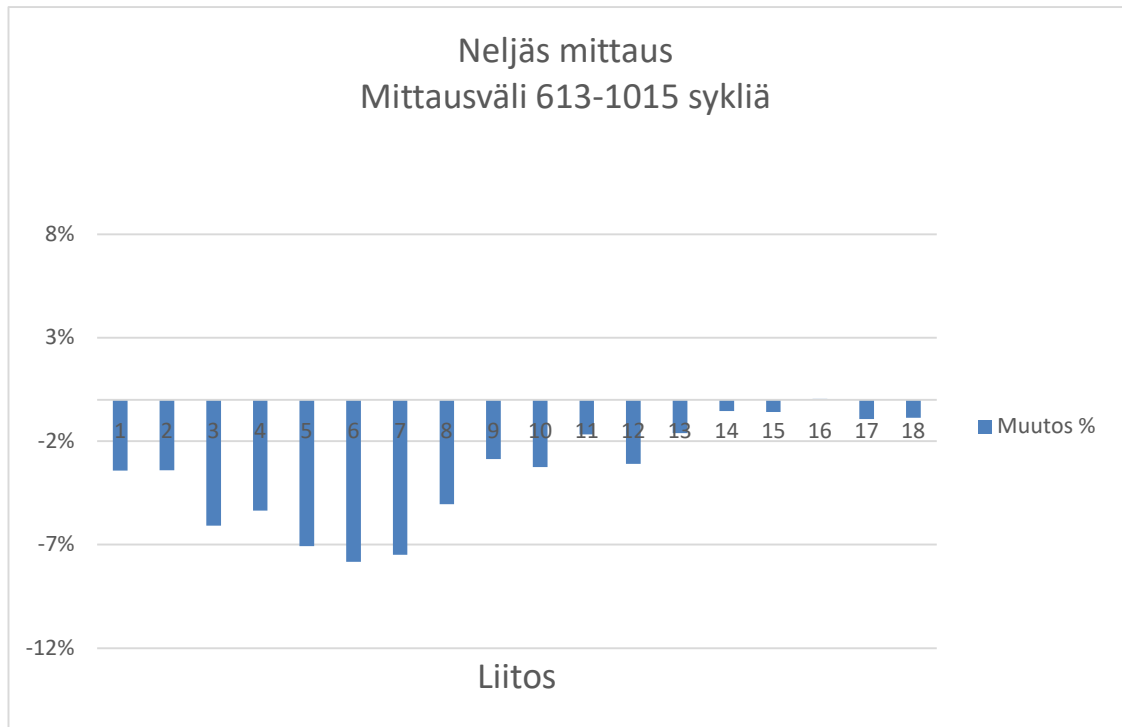
Tutkimuksen neljäs ja viides mittaus suoritettiin kokeen lopussa 1015 syklin kohdalla siten, että viides mittaus suoritettiin vuorokausi neljännen mittauksen jälkeen. Neljännen ja viidennen mittauksen mittaustulokset taulukoituna liitteissä 4 ja 5.

Kuviossa 37 liitosresistanssit verrattuna lähtötilanteeseen. Pois lukien oletetun kirjausvirheen sisältävä liitos 17, liitokset ovat toimineet hyvin resistanssin muutosten ollessa enimmillään vain noin -7 %. Kuviossa 37 muutos prosentteina lähtötilanteesta.



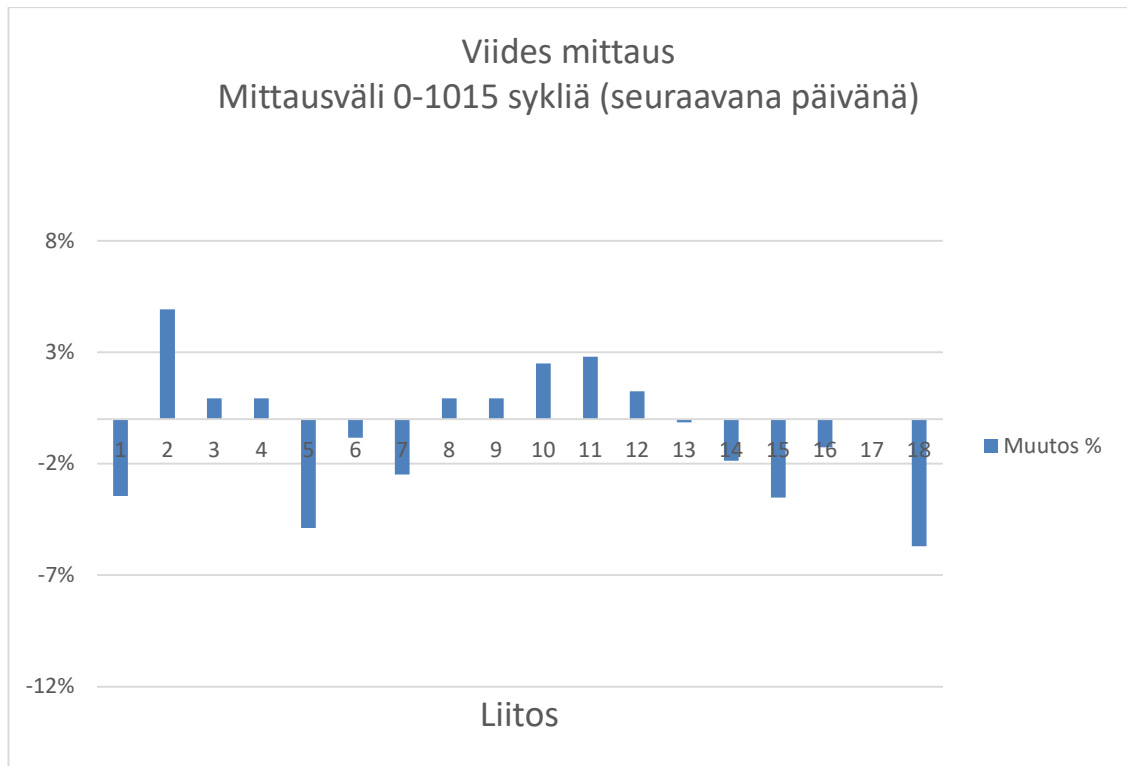
Kuvio 37. Liitosresistanssin muutos prosentteina lähtötilanteesta.

Kuviossa 38 voidaan havaita liitosresistanssin laskeneen yhtenäisesti verrattuna edelliseen mittaukseen. Yksikään liitos ei tälläkään mittauskerralla eroa muista huomattavasti.



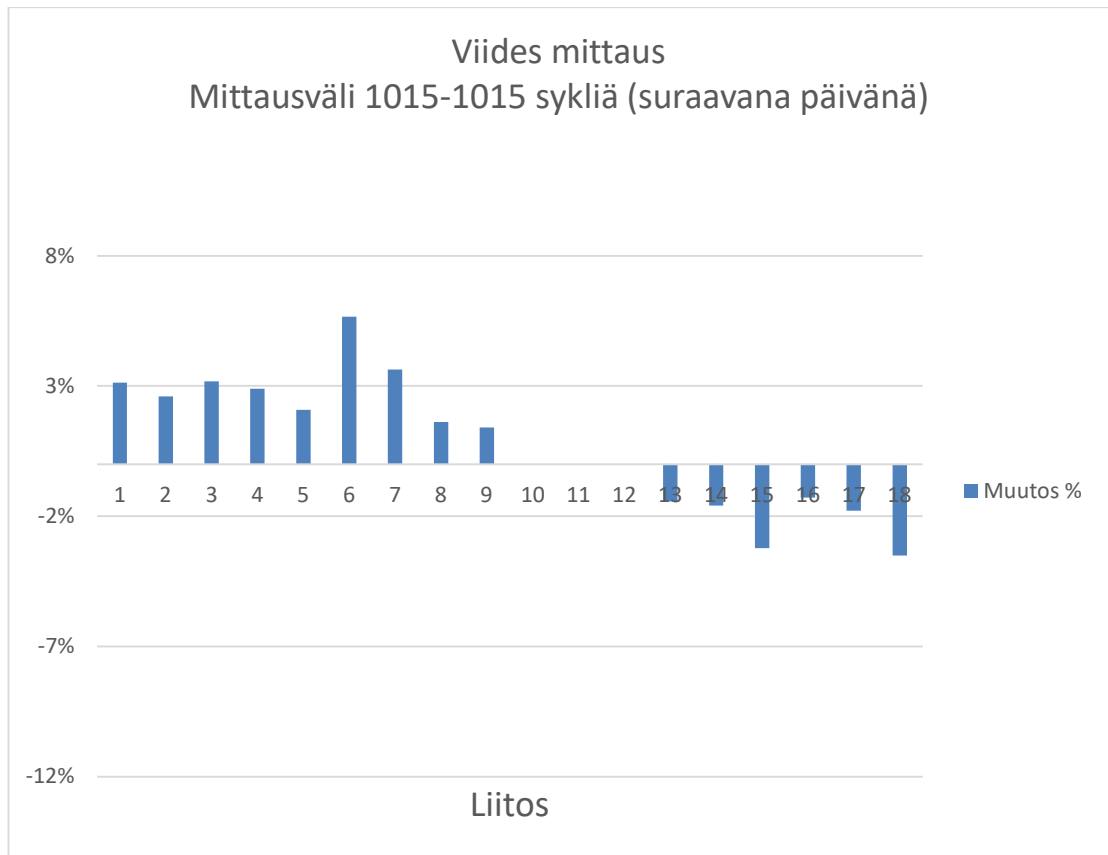
Kuvio 38. Liitosresistanssin muutos prosentteina edelliseen mittaukseen verrattuna.

Kuviosta 39 voidaan havaita liitosresistanssien muuttuneen hieman verrattuna neljänteen mittaukseen ja kuvioon 38.



Kuvio 39. Liitosresistanssin muutos prosentteina lähtötilanteesta.

Kuviosta 40 voidaan havaita liitosresistanssien muutos seuraavana päivänä edellisestä mittauksesta. Resistanssin muutokset ovat enimmillään noin 6 %.



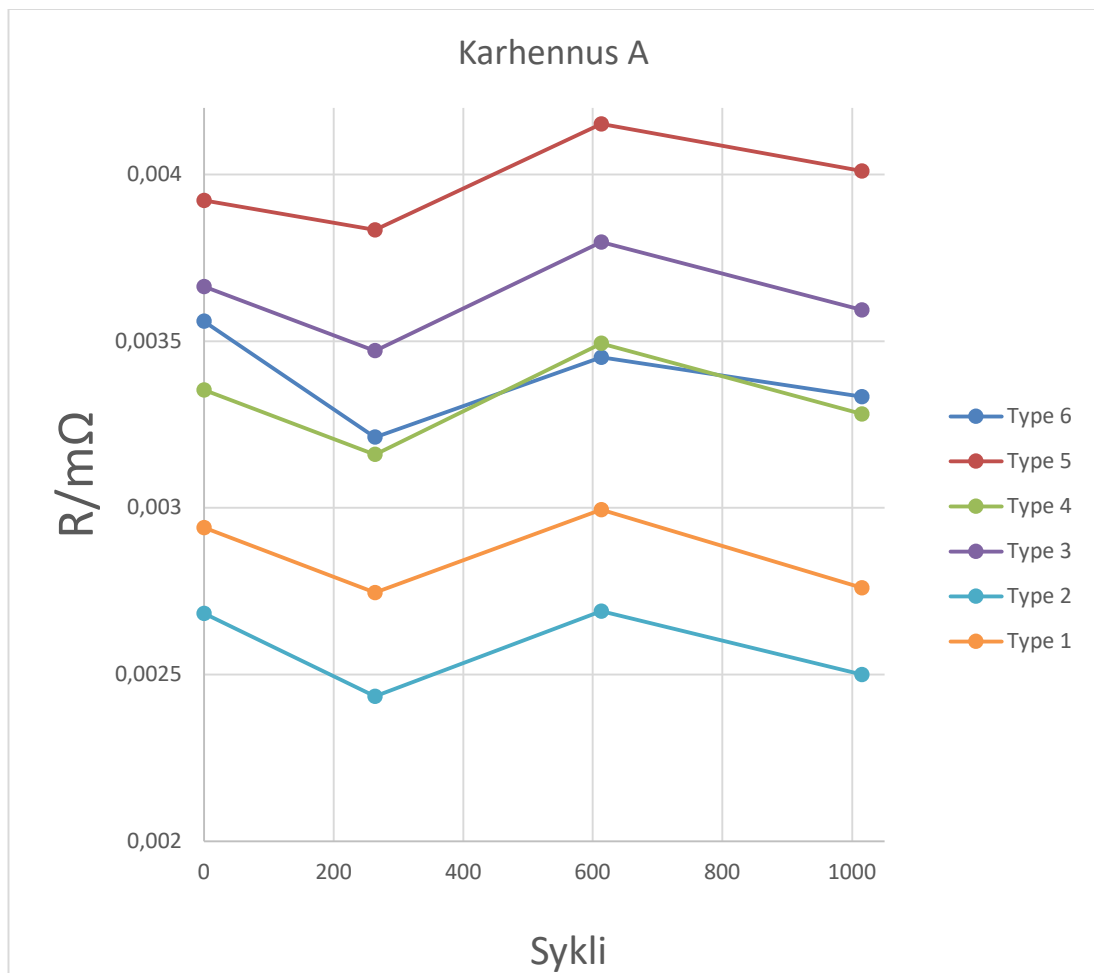
Kuvio 40. Liitosresistanssin muutos prosentteina edelliseen mittaukseen verrattuna.

8.5 Tulokset karhennustyyleitään

Tässä luvussa esitetään tulokset XY-kuvaajissa ja vertaillaan eri karhennustyyliä.

8.5.1 Karhennustyyli A

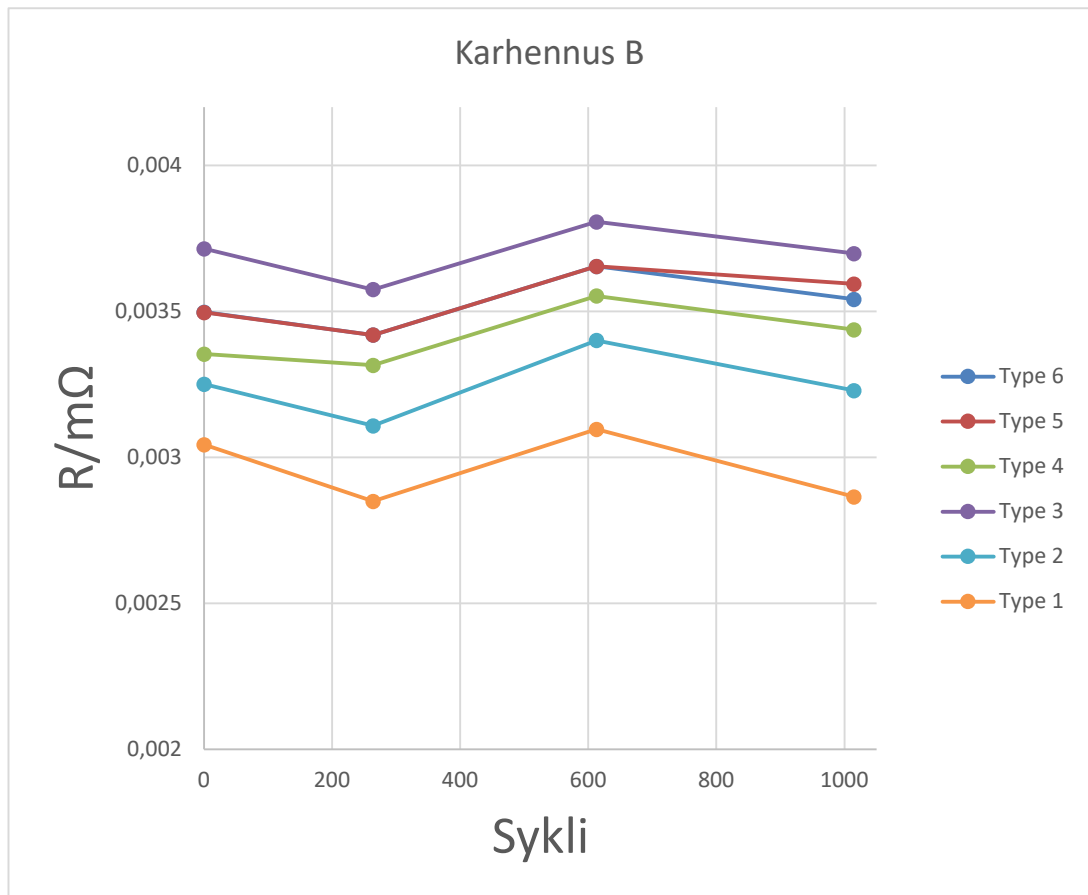
Kuviosta 41 voidaan havaita, että karhennustyyllillä A karhennetut alumiinikiskot ovat toimineet liitosresistanssien osalta oletetusti. Jokaisen liitostyyppin resistanssi käyttäytyy samalla tavalla; toisen mittauksen kohdalla arvot hieman laskevat, kolmannen mittauksen kohdalla taas hieman nousevat ja viimeisen mittauksen kohdalla hieman laskevat.



Kuvio 41. Karhennustyylin A mittaustulokset XY-kuvaajassa.

8.5.2 Karhennustyyli B

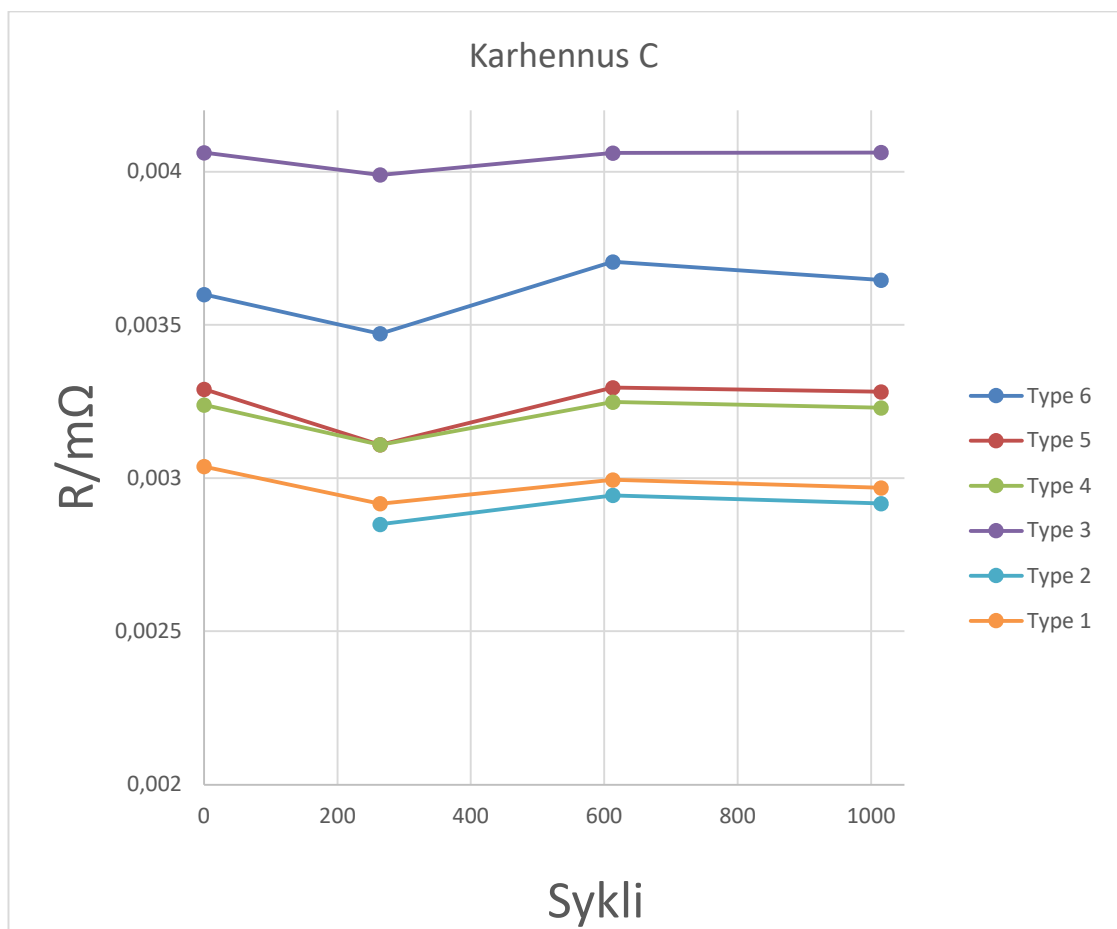
Kuviosta 42 voidaan havaita trendien seuraavan karhennustyylin A liitostyyppien trendejä. Liitosresistanssien vaihtelu on liitostyypeittäin pientä ja samansuuntaista, kun verrataan liitoksia keskenään.



Kuvio 42. Karhennustyylin B mittaustulokset XY-kuvaajassa.

8.5.3 Karhennustyyli C

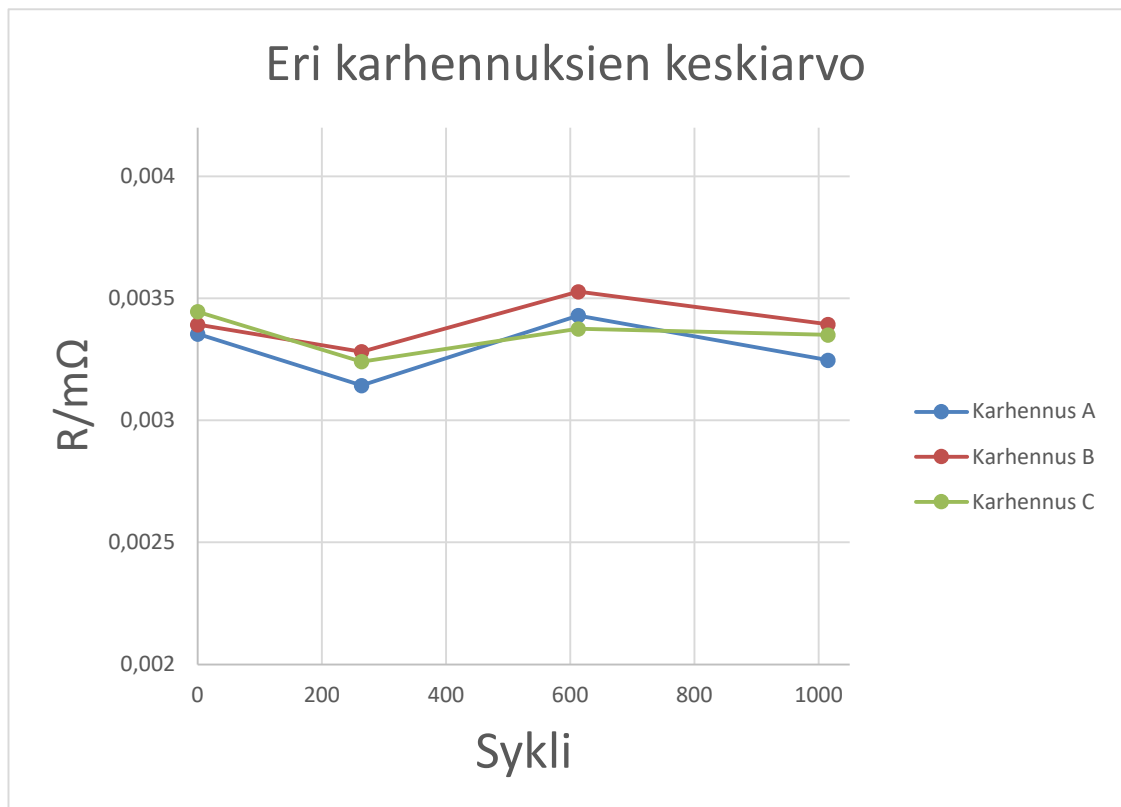
Karhennustyylin C liitosresistanssit vaihtelivat keskimäärin edellisiä karhennustyyliä vähemmän. Kuitenkin liitoksen Type 2 resistanssi laskee ensimmäisen ja toisen mittauksen välissä selvästi muita enemmän. Kyseinen liitos on jo aiemmin käsitelty, kirjausvirhe sisältävä liitos numero 17. Kuviossa 43 karhennustyylin C mittaustulokset.



Kuvio 43. Karhennustyylin C mittaustulokset XY-kuvaajassa.

8.6 Eri karhennustyylien vertailu keskenään

Kuviossa 44 vertailussa eri karhennuksien keskiarvot eri mittauskohdissa. Kuvio 44 havainnollistaa entisestään eri karhennuksien käyttäytymisen kokeen aikana.



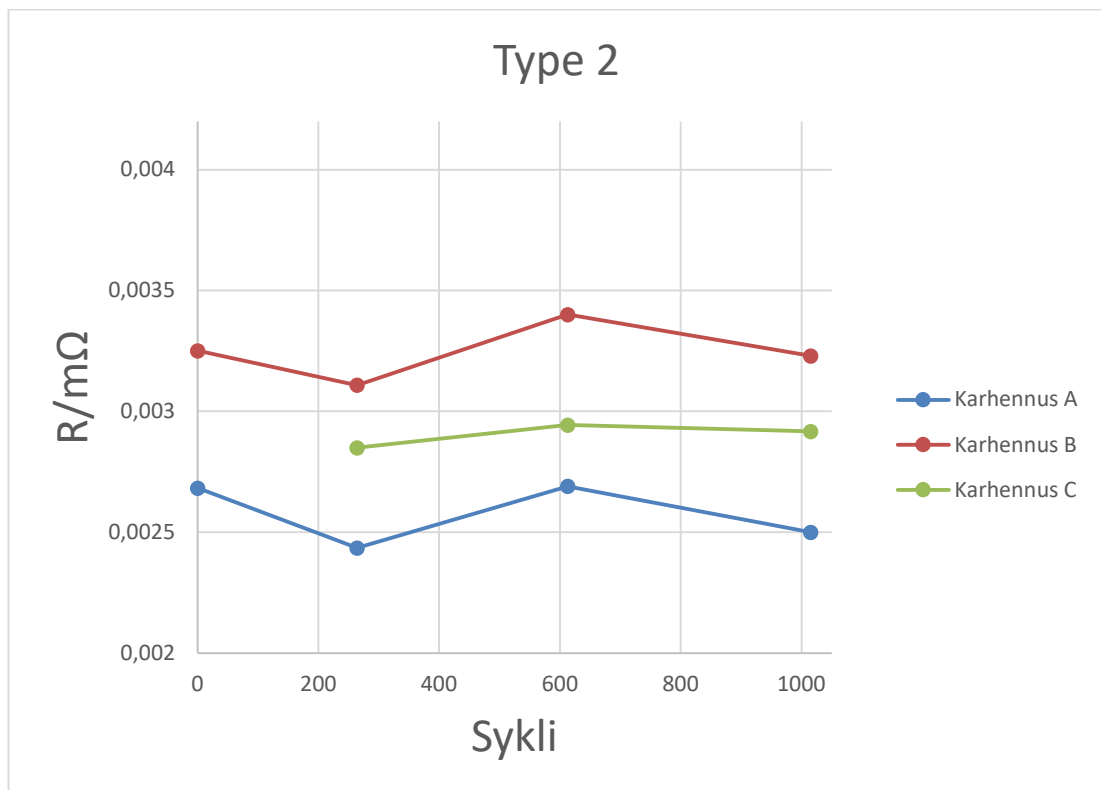
Kuvio 44. Eri karhennuksien keskiarvot verrattuna toisiinsa XY-kuvaajassa.

8.7 Tulokset liitostyypeittäin

Alla esitettynä mittaustuloksista saadut arvot XY-kuvaajissa eri liitostyyppien näkökulmasta. Liitostyypille Type 1 ei ole omaa kuvaajaa, sillä Type 1 on kahden kuparikiskon välinen pulttiliitos, jolloin karhennusta ei tule.

8.7.1 Type 2

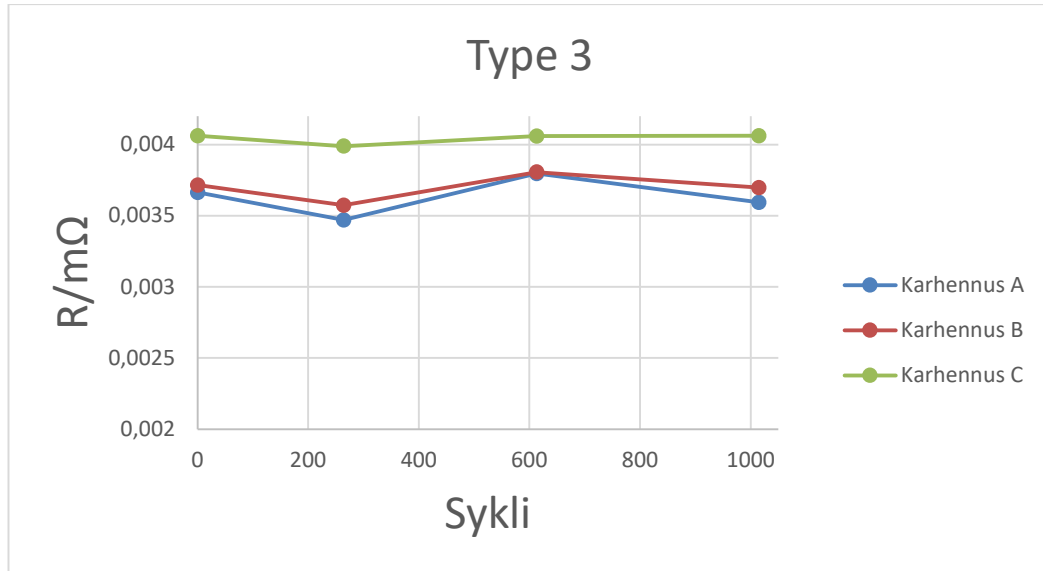
Kuviossa 45 esitettynä Type 2 liitostyyppin tulokset eri karhennuksilla. Ensimmäinen mittauskerta karhennustyyliässä C on jätetty pois kirjausvirheen vuoksi.



Kuvio 45. Type 2 eri karhennuksilla.

8.7.2 Type 3

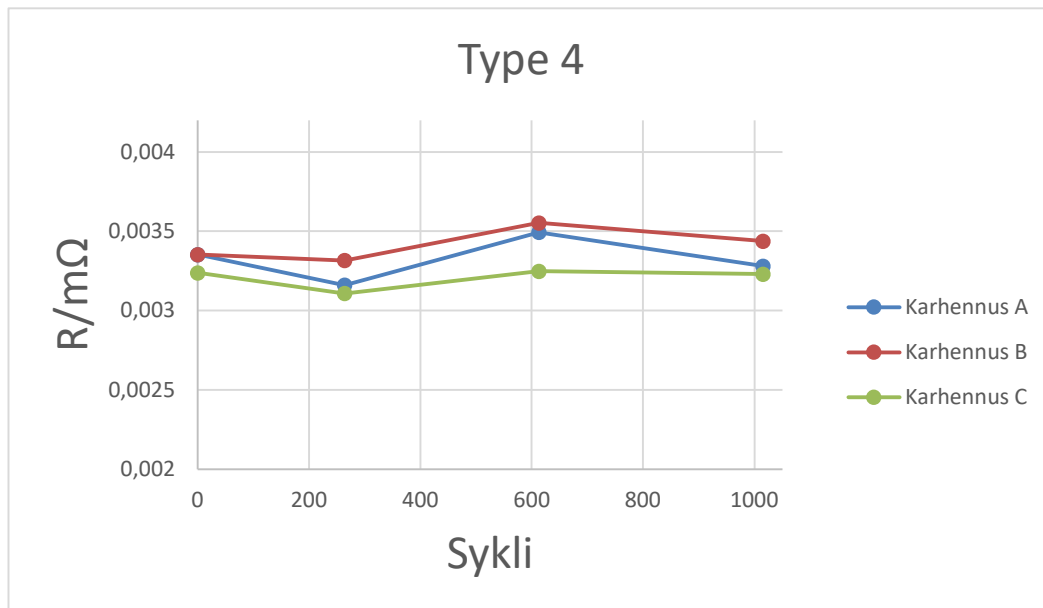
Kuviossa 46 esitettynä Type 3 liitostyyppin tulokset eri karhennuksilla.



Kuvio 46. Type 3 eri karhennuksilla.

8.7.3 Type 4

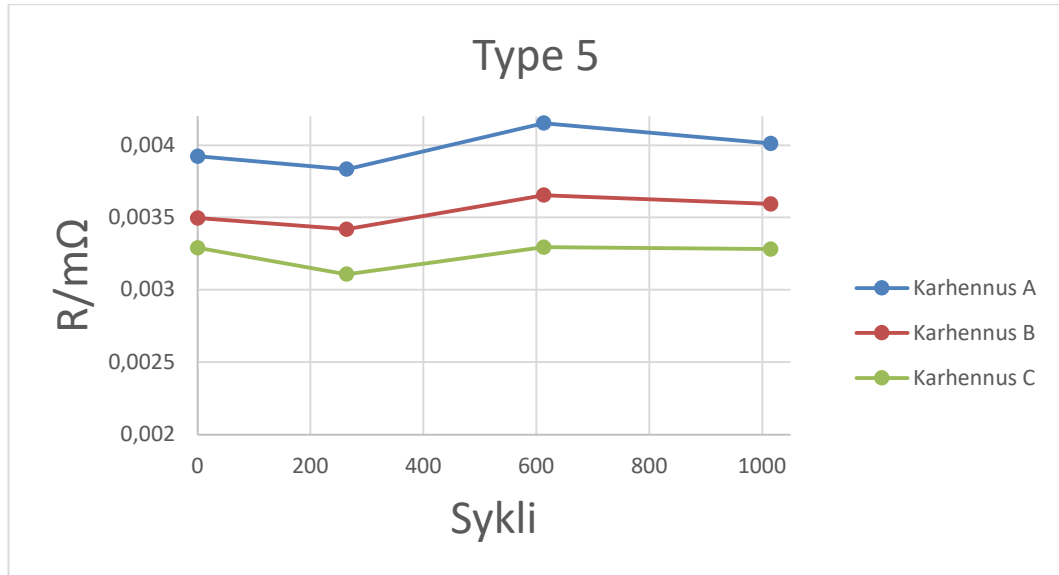
Kuviossa 47 esitettynä Type 4 liitostyyppin tulokset eri karhennuksilla.



Kuvio 47. Type 4 eri karhennuksilla.

8.7.4 Type 5

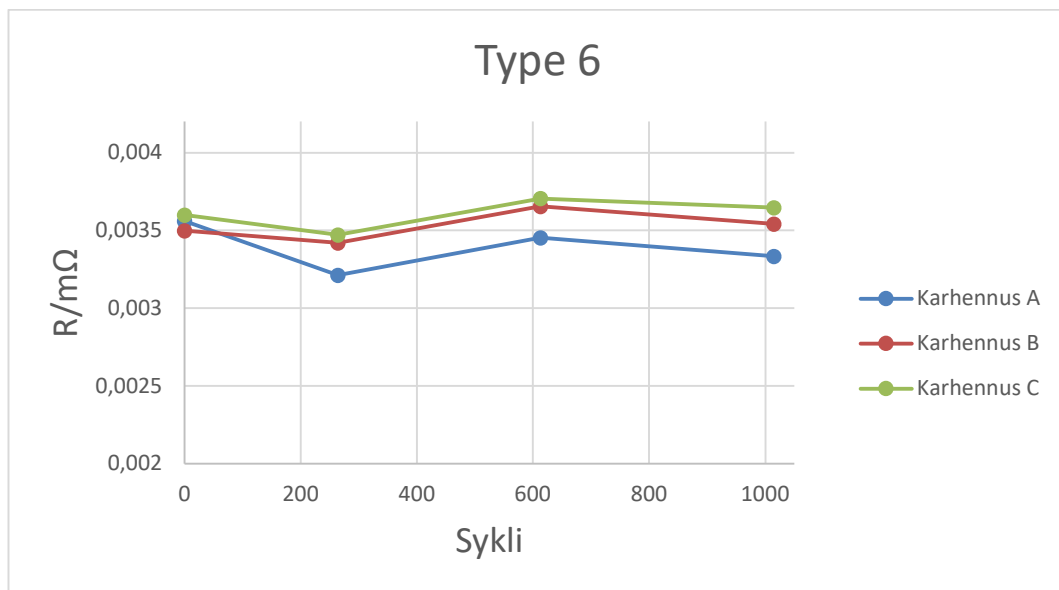
Kuviossa 48 esitettynä Type 4 liitostyyppin tulokset eri karhennuksilla.



Kuvio 48. Type 5 eri karhennuksilla.

8.7.5 Type 6

Kuviossa 49 esitettynä Type 6 liitostyyppin tulokset eri karhennuksilla.



Kuvio 49. Type 6 eri karhennuksilla.

9 TULOSTEN ANALYYSI

264 syklin kohdalla voidaan huomata liitoksissa pientä, alle 10 % resistanssin muutosta verrattuna alkutilanteeseen. Liitos numero 17 ensimmäinen mittausta on jätetty huomiotta, sillä tuloksen kirjaamisessa oletetaan tapahtuneen kirjausvirhe. Toisen mittauksen mittaustulokset taulukoituna liitteessä 2.

Kuviosta 34 voidaan havaita liitoksilla olleen yhteinen trendi: kaikkien liitosten liitosresistanssi on laskenut lähtötilanteesta. Varsinainen muutos resistanssissa on kuitenkin hyvin pientä, keskiarvon ollessa 0,15 $\mu\Omega$.

Kolmannessa mittauksessa, tutkimuksen puolella välissä 613 syklin kohdalla, voidaan kuviosta 35 havaita liitosresistanssien muuttuneen takaisin päin alkutilannetta kohti. Valtaosan liitoksista ollessa nyt lähellä nollaa, tai hieman positiivisen puolella. Kolmannen mittauksen mittaustulokset taulukoituna liitteessä 3.

Myös liitos numero 17 on pysynyt lähes samana, muutoksen ollessa 3 %. Tämä pieni muutos tukee aiempaa teoriaa siitä, että toisessa mittauksessa olisi tapahtunut kirjausvirhe.

Yleinen trendi on myös liitoksien välillä pysynyt samana. Jokaisen liitoksen liitosresistanssi on muuttunut samaan suuntaan. Tästä voidaan päätellä, että jokainen liitos käyttäytyy tässä kohtaa koetta samalla tavalla.

Jokaisella karhennustyyllillä karhennetut liitokset ovat käyttäytyneet kokeen aikana samalla tavalla. Toisessa mittauspisteessä liitosresistanssit ovat laskeneet lähtötilanteesta. Kolmannessa pisteessä resistanssit kasvavat. Neljännessä pisteessä resistanssit taas hieman laskevat.

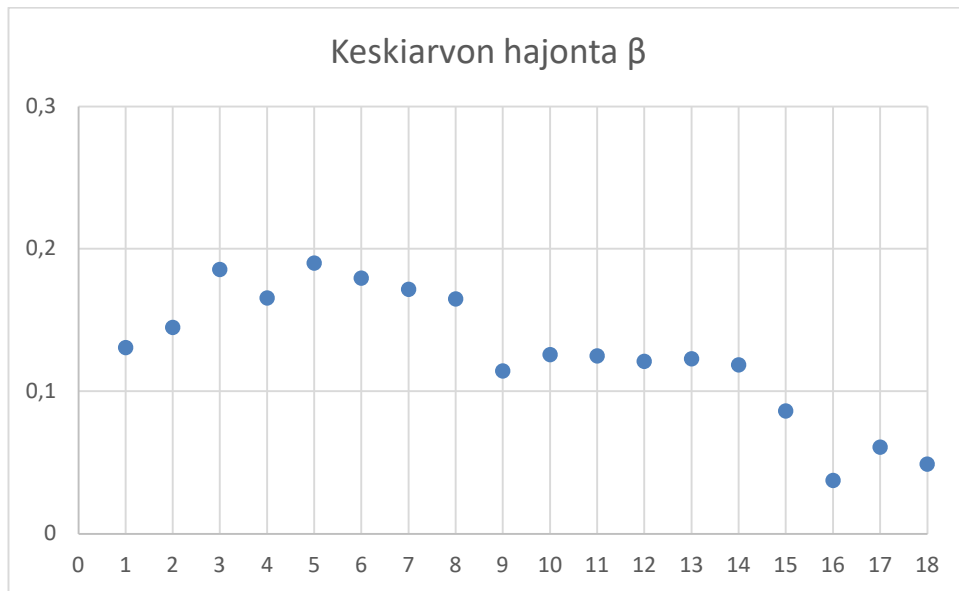
9.1 IEC 61238-1-1 mukaiset raja-arvot

Virtakiskojen testaamiseen ei ole omaa standardia. Tämän vuoksi työssä on käytetty apuna aiemmin kappaleessa viisi käsiteltyä kaapeleiden liitoksiin tarkoitettua standardia ja sen asettamia raja-arvoja. Kaikkia raja-arvoja ei tässä työssä voitu laskea, sillä mittausvälit olivat liian harvat ja sama liitos esiintyi liian harvoin. Jotta osa standardin määrittämistä raja-arvoista voidaan laskea tässä kyseisessä työssä, täytyy joillekin arvoille antaa päätellyt vakioarvot. Studentin t-jakauma on valittu standardista poiketen 90 % merkitsevyystasolla ja 1 vapausasteella pienen otannan vuoksi.

Seuraavassa luvussa on laskettu kaikki laskettavissa olevat standardin mukaiset raja-arvot. Laskettavissa olevat raja-arvot olivat keskiarvon hajonta β , muutos resistanssin kertoimessa D ja resistanssin kertoimen suhde λ . Raja-arvojen laskuun käytetyt kaavat on muokattu standardissa mainitusta 11 mittauksesta työssä käytettyyn kolmeen mittaukseen. Standardissa mainittu resistanssin korjauskerroin k on tässä työssä oletettu arvoksi 1. Resistanssin kerroin k pitää sisällään lämpötilakorjauksen sekä mittauspisteiden muutoksesta johtuvan eron korjauksen. Tässä työssä mittaukset suoritettiin samassa lämpötilassa ja mittauspisteet olivat jokaisessa kiskossa samassa kohdassa. Täten korjauskertoimen k voi jättää tässä työssä huomiotta.

9.1.1 Keskiarvon hajonta β

Kuviossa 50 on esitettyä keskiarvon hajonta pistekaaviossa. Pisteet kuvaajaan on laskettu kaavalla 7 muokaten kaavaa 11 mittauskerrasta tässä työssä mitattuun kolmeen mittauskertaan. Standardin esittämä enimmäisarvo on 0,30.

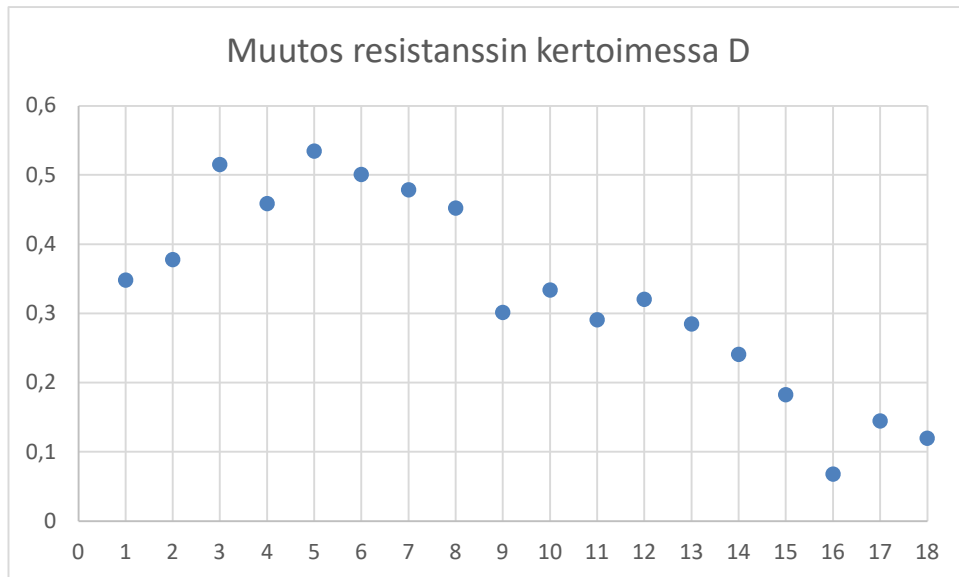


Kuvio 50. Keskiarvon hajonta β .

Kuviosta 50 voidaan havaita kaikkien liitostyyppien asettuvan standardin vaatiman raja-arvon sisälle. Jokaisen liitostyyppin voidaan tämän kohdan osalta olettaa toimivan halutusti.

9.1.2 Muutos resistanssin kertoimessa D

Kuviossa 51 on esitettyä muutos resistanssin kertoimessa pistekaaviossa. Pisteet kuvaajaan on laskettu kaavalla 13. Standardin esittämä enimmäisarvo on 0,15.



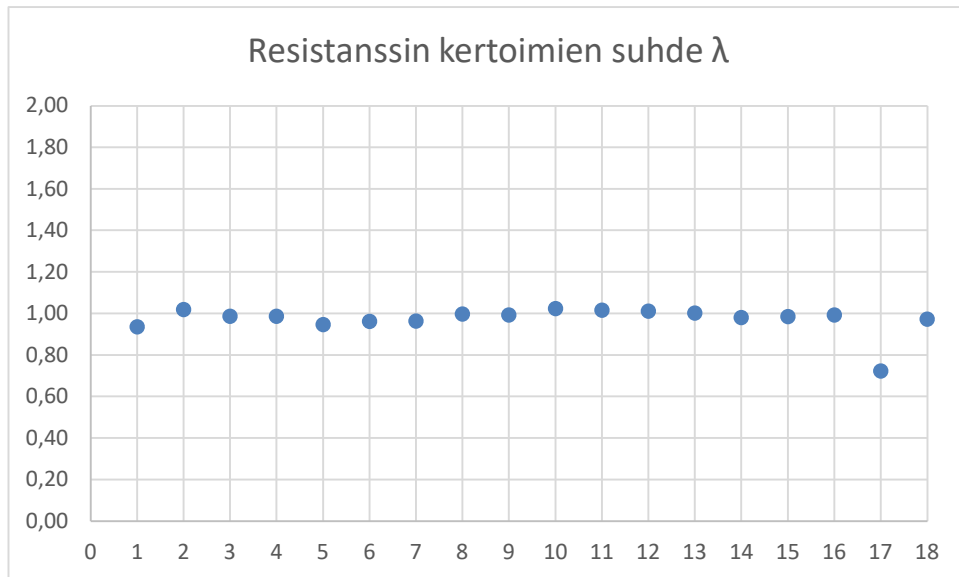
Kuvio 51. Muutos resistanssin kertoimessa D.

Kuten kuviosta 51 voidaan havaita, muutos resistanssin kertoimelle D ylittää standardin vaatiman 0,15 rajan kaikilla muilla, paitsi kolmella viimeisellä liitoksella. Tämä johtuu siitä, että otannan ollessa näin vähäinen, Studentin t-jakauma kasvaa suureksi. Standardissa mainitulla 11 mittauskerralla sen ollessa 1,833, kun tässä työssä kolmella mittauskerralla se on 6,314.

Studentin t-jakauman kasvaessa suureksi, kasvaa myös kaavassa 12 esitetty yksikkökohtainen hajonta S. Yksikkökohtaisen hajonnan S ollessa kertoimena resistanssin muutosta esittävälle kertoimelle D, kasvaa myös D.

9.1.3 Resistanssin kertoimien suhde λ

Kuviossa 52 on esitetty resistanssin kertoimien suhde pistekaaviossa. Pisteet kuvaajaan on laskettu kaavalla 14. Standardin mukainen enimmäisarvo on 2,0.



Kuvio 52. Resistanssin kertoimien suhde λ .

Kuviosta 52 voidaan havaita kaikkien liitosten alittavan standardin asettaman raja-arvon reilusti.

10 YHTEENVETO

Opinnäytetyö oli mielenkiintoinen ja melko laaja. Työtä tehdessä opin paljon lisää sähköön johtavuuteen vaikuttavista tekijöistä sekä tulosten analyysistä ja raportoinnista. Mittauskokoontalon rakentaminen Creolla oli työn puolesta ennestään tuttua.

Työn toteuttaminen vaati perehtymistä tilastomatematiikkaan, Excelin käyttöön sekä sähkökemian ja -fysiikkaan. Haasteita työssä tuotti aiheen teoriapuoli ja standardin soveltaminen työhön, sillä standardi sisälsi tulosten tulkintaa tilastomatematiikan avulla, mikä ei ollut entuudestaan tuttua.

Työstä saatiin tärkeää tietoa uusien niittimuttereiden ja uuden karhennustyökalun toiminnasta, sekä yleisesti erilaisten pulttiliitosten vaikutuksesta johtavuuteen. Kaikki työssä tutkittavat liitokset todettiin tutkimuksen ja standardin raja-arvojen perusteella toimiviksi. Tätä työtä voidaan jatkossa käyttää todentamaan niittimuttereiden ja uuden karhennustyökalun toimivuus.

Pulttiliitosten tutkimisessa on edelleen aihetta jatkokehitykselle. Tässä työssä tutkittavat liitokset esiintyivät mittauskokoontalossa liian harvoin. Jotta kunnollista tilastollista tarkastelua voidaan tehdä, täytyisi saman liitoksen esiintyä noin seitsemän kertaa. Tämä tietysti vaatisi paljon suuremman tilan kokeen järjestämiseksi. Koe olisi myös järkevää suunnitella alusta saakka, esimerkiksi tässäkin työssä käytettävän, IEC standardin mukaisesti. Tällöin raportointi ja tulosten analyysi olisi paljon helpompaa ja nopeampaa.

LÄHTEET

/1/ Historia. ABB. Viitattu 03.06.2021. <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/historia>

/2/ Hitachi. History. Viitattu 05.06.2021. <https://www.hitachi.com/corporate/about/history/index.html>

/3/ Laurila, A., Ilkka-Pohjalainen. 27.10.2020. Japanilainen omistaja toi uudet arvot, 48–49. Viitattu 19.06.2021.

/4/ Hitachi. Transformers in Finland. Viitattu 14.02.2023
<https://inside.hitachienergy.com/fi/fi/our-company/about-us>

/4/ Muuntaja yleisesti. Trafomic. Viitattu 05.06.2021.
<https://www.trafomic.fi/muuntaja-yleisesti>

/5/ Muuntajatekniikan perusteet. ABB:n sisäinen koulutusmateriaali. Viitattu 21.06.2021

/6/ 6101 (E- AlMgSi , 91E) Aluminum. Viitattu 09.02.2023.
<https://www.makeitfrom.com/material-properties/6101-E-AlMgSi-91E-Aluminum>

/7/ Alumiini ja alumiiniseokset. Viitattu 09.02.2023.

<https://valmistajat.fi/materiaalit/alumiini-ja-alumiiniseokset>

/8/ Alumiinin oksidikerros. Viitattu 09.02.2023.

<https://www.alumeco.fi/asiantuntemus-ja-teknikka/yleista/oksidikerros/?s=0>

/9/ Al- ja Cu-johtimien päättäminen ja liittäminen liitäntäalustaan. Viitattu 09.02.2023.

<https://ideat.sonepar.fi/al-ja-cu-johtimien-paattaminen-ja-liittaminen-liitantaalustaan/>

/10/ Kupari ja kupariseokset. Viitattu 09.02.2023.

<https://valmistajat.fi/materiaalit/metallit/kupari-ja-kupariseokset>

/11/ Teräsrakenneyhdistys. Korroosio. Viitattu 09.02.2023.

<https://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/151/8ac778e/korroosio.pdf>

/12/ IEC 61238-1-1. Compression and mechanical connectors for power cables – Part 1-1: Test methods and requirements for compression and mechanical connectors for power cables for rated voltages up to 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) tested on non-insulated conductors. Viitattu 11.05.2023

Liite 1. Ensimmäinen mittaus.

23/08/2021		0 sykliä	
I/A	U/mV	R1/mΩ	
1	193.8	0.69	0.00356
2	193.8	0.76	0.003922
3	193.8	0.65	0.003354
4	193.8	0.71	0.003664
5	193.8	0.52	0.002683
6	193.8	0.57	0.002941
7	193.8	0.59	0.003044
8	193.8	0.63	0.003251
9	193.8	0.72	0.003715
10	193.8	0.65	0.003354
11	194.5	0.68	0.003496
12	194.4	0.68	0.003498
13	194.5	0.7	0.003599
14	194.5	0.64	0.00329
15	194.5	0.63	0.003239
16	194.5	0.79	0.004062
17	194.5	0.78	0.00401
18	194.2	0.59	0.003038

Liite 2. Toinen mittaus.

	15/09/2021		264 sykliä		
	I/A	U/mV	R2/mΩ	R2-R1	Muutos %
1	193	0.62	0.0032124	-0.00035	-9.8 %
2	193	0.74	0.0038342	-0.00009	-2.2 %
3	193	0.61	0.0031606	-0.00019	-5.8 %
4	193	0.67	0.0034715	-0.00019	-5.2 %
5	193	0.47	0.0024352	-0.00025	-9.2 %
6	193	0.53	0.0027461	-0.00020	-6.6 %
7	193	0.55	0.0028497	-0.00019	-6.4 %
8	193	0.6	0.0031088	-0.00014	-4.4 %
9	193	0.69	0.0035751	-0.00014	-3.8 %
10	193	0.64	0.0033161	-0.00004	-1.1 %
11	193	0.66	0.0034197	-0.00008	-2.2 %
12	193	0.66	0.0034197	-0.00008	-2.2 %
13	193	0.67	0.0034715	-0.00013	-3.5 %
14	193	0.6	0.0031088	-0.00018	-5.5 %
15	193	0.6	0.0031088	-0.00013	-4.0 %
16	193	0.77	0.0039896	-0.00007	-1.8 %
17	193	0.55	0.0028497	-0.00116	-28.9 %
18	192	0.56	0.0029167	-0.00012	-4.0 %

Liite 3. Kolmas mittaus.

	18/10/2021		613 sykliä				
	I/A	U/mV	R3/mΩ	R3-R2	Muutos %	R3-R1	Muutos %
1	197	0.68	0.0034518	0.0002393	7 %	-0.0001086	-3 %
2	198	0.82	0.0041519	0.0003177	8 %	0.0002303	6 %
3	198	0.69	0.0034937	0.0003330	11 %	0.0001397	4 %
4	198	0.75	0.0037975	0.0003260	9 %	0.0001339	4 %
5	197	0.53	0.0026904	0.0002551	10 %	0.0000072	0 %
6	197	0.59	0.0029949	0.0002488	9 %	0.0000537	2 %
7	197	0.61	0.0030964	0.0002467	9 %	0.0000521	2 %
8	197	0.67	0.003401	0.0002922	9 %	0.0001502	5 %
9	197	0.75	0.0038071	0.0002320	6 %	0.0000919	2 %
10	197	0.7	0.0035533	0.0002372	7 %	0.0001993	6 %
11	197	0.72	0.0036548	0.0002351	7 %	0.0001587	5 %
12	197	0.72	0.0036548	0.0002351	7 %	0.0001569	4 %
13	197	0.73	0.0037056	0.0002341	7 %	0.0001066	3 %
14	197	0.65	0.0032995	0.0001907	6 %	0.0000090	0 %
15	197	0.64	0.0032487	0.0001399	5 %	0.0000097	0 %
16	197	0.8	0.0040609	0.0000713	2 %	-0.0000008	0 %
17	197	0.58	0.0029442	0.0000944	3 %	-0.0010661	-27 %
18	197	0.59	0.0029949	0.0000783	3 %	-0.0000432	-1 %

Liite 4. Neljäs mittaus.

	22/11/2021		1015 sykliä				
	I/A	U/mV	R4/mΩ	R4-R3	Muutos %	R4-R1	Muutos %
1	192	0.64	0.0033333	-0.0001184	-3 %	-0.0002270	-6 %
2	192	0.77	0.0040104	-0.0001415	-3 %	0.0040104	2 %
3	192	0.63	0.0032813	-0.0002124	-6 %	0.0032813	-2 %
4	192	0.69	0.0035938	-0.0002037	-5 %	0.0035938	-2 %
5	192	0.48	0.0025	-0.0001904	-7 %	0.0025000	-7 %
6	192	0.53	0.0027604	-0.0002345	-8 %	0.0027604	-6 %
7	192	0.55	0.0028646	-0.0002319	-7 %	0.0028646	-6 %
8	192	0.62	0.0032292	-0.0001718	-5 %	0.0032292	-1 %
9	192	0.71	0.0036979	-0.0001092	-3 %	0.0036979	0 %
10	192	0.66	0.0034375	-0.0001158	-3 %	0.0034375	2 %
11	192	0.69	0.0035938	-0.0000611	-2 %	0.0035938	3 %
12	192	0.68	0.0035417	-0.0001132	-3 %	0.0035417	1 %
13	192	0.7	0.0036458	-0.0000598	-2 %	0.0036458	1 %
14	192	0.63	0.0032813	-0.0000182	-1 %	0.0032813	0 %
15	192	0.62	0.0032292	-0.0000196	-1 %	0.0032292	0 %
16	192	0.78	0.0040625	0.0000016	0 %	0.0040625	0 %
17	192	0.56	0.0029167	-0.0000275	-1 %	0.0029167	-27 %
18	192	0.57	0.0029688	-0.0000262	-1 %	0.0029688	-2 %

Liite 5. Viides mittaus.

	23/11/2021		1015 sykliä				
	I/A	U/mV	R5/mΩ	R5-R4	Muutos %	R5-R1	Muutos %
1	192	0.66	0.0034375	0.0001042	3 %	-0.0001229	-3 %
2	192	0.79	0.0041146	0.0001042	3 %	0.0001930	5 %
3	192	0.65	0.0033854	0.0001042	3 %	0.0000314	1 %
4	192	0.71	0.0036979	0.0001042	3 %	0.0000343	1 %
5	192	0.49	0.0025521	0.0000521	2 %	-0.0001311	-5 %
6	192	0.56	0.0029167	0.0001563	6 %	-0.0000245	-1 %
7	192	0.57	0.0029688	0.0001042	4 %	-0.0000756	-2 %
8	192	0.63	0.0032813	0.0000521	2 %	0.0000305	1 %
9	192	0.72	0.00375	0.0000521	1 %	0.0000348	1 %
10	192	0.66	0.0034375	0.0000000	0 %	0.0000835	2 %
11	192	0.69	0.0035938	0.0000000	0 %	0.0000976	3 %
12	192	0.68	0.0035417	0.0000000	0 %	0.0000437	1 %
13	192	0.69	0.0035938	-0.0000521	-1 %	-0.0000052	0 %
14	192	0.62	0.0032292	-0.0000521	-2 %	-0.0000613	-2 %
15	192	0.6	0.003125	-0.0001042	-3 %	-0.0001141	-4 %
16	192	0.77	0.0040104	-0.0000521	-1 %	-0.0000513	-1 %
17	192	0.55	0.0028646	-0.0000521	-2 %	-0.0011457	-29 %
18	192	0.55	0.0028646	-0.0001042	-4 %	-0.0001735	-6 %