



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ilkka Dits

TEHOMUUNTAJAN EPÄMAGNEETTIS-
TEN METALLIOSIEN LÄMPENEMINEN
SUURVIRTAJOHTIMIEN
LÄHEISYYDESSÄ

Tekniikka ja liikenne

2010

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Vaasan ammattikorkeakoulun sähkötekniikan koulutusohjelmassa kevään 2010 aikana. Työ tehtiin ABB Oy Muuntajat -yksikössä Vaasassa. Laboratoriomittaukset suoritettiin ABB Electrotest Oy testilaboratoriossa.

Korkeakoulun puolesta työn ohjaajana toimi lehtori, diplomi-insinööri Aarre Perälä, jota haluan kiittää yhteistyöstä. Yrityksen puolesta ohjaajina toimivat tuotepäällikkö, diplomi-insinööri Otso Takala sekä erikoisasantuntija, fil. tri. Hasse Nordman, joita haluan kiittää työn toteutumisesta ja ohjauksesta. Lisäksi haluan kiittää kaikkia, jotka auttoivat työn valmistumisessa.

Vaasa 8.6.2010

Ilkka Dits

Kapteeninkatu 38 as. 12

65200 VAASA

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Ilkka Dits
Opinnäytetyön nimi	Tehomuuntajan epämagneettisten metalliosien lämpeneminen suurvirtajohtimien läheisyydessä.
Vuosi	2010
Kieli	suomi
Sivumäärä	61 + 5 liitettä
Ohjaaja	Aarre Perälä

Suurvirtajohtimien magneettikentät synnyttävät muuntajan seinämiin ja muihin metallirakenteisiin paikallisia häviökeskittymiä, jotka ilmenevät rakenteiden lämpenemisenä. Ilmiötä tutkittiin vuonna 2006 tehdyssä diplomityössä, jossa tutkittiin tehomuuntajan rautaosien lämpenemistä. Tässä työssä tuota tutkimusta jatkettiin tutkimalla erilaisten epämagneettisten seinämärakenteiden ja sydämen puristus-palkkeina käytettyjen metalliosien lämpenemistä suurvirtakiskoston läheisyydessä. Kaikki mittaukset tehtiin mahdollisimman samankaltaisesti kuin edellisissä mittauksissa, jotta saataisiin vertailukelpoisia tuloksia.

Työssä tutkittiin teorian avulla epämagneettisten materiaalien fysikaalisia ominaisuuksia ja laboratoriokokeiden avulla epämagneettisten rakenteiden lämpenemän riippuvuutta syöttövirrasta, testikappaleen ja johtimien etäisyydestä sekä syöttövirran taajuudesta. Epämagneettisia rakenteita käytetään esimerkiksi uuni- ja tasisuuntaajamuuntajissa, joiden kuormitusvirta voi olla hyvin yliaaltopainotteinen.

Testikappaleina käytettiin suojaamatonta austeniittiteräslevyä, kuparilla suojattua austeniittiteräslevyä sekä kolmea erilaista tehomuuntajan sydämen puristus-palkkeina käytettävää palkkia.

Tavoitteena oli löytää laboratoriotestien ja tietokonelaskelmien avulla matemaattiset mallit muuntajan metalliosien lämpenemän laskemiseksi. Laboratoriomittauksia tehtiin 40 kappaletta ja niistä saatiin lämpenemän riippuvuudet syöttövirrasta 10 kA asti, syöttövirran taajuudesta 250 Hz asti sekä johtimien ja kappaleen etäisyydestä 200 mm asti.

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Sähkötekniikka

ABSTRACT

Author	Ilkka Dits
Title	Local Temperature Rises of Non-magnetic Materials in Vicinity of High Current Leads in Power Transformer
Year	2010
Language	Finnish
Pages	61 + 5 appendices
Name of Supervisor	Aarre Perälä

The purpose of the thesis was to investigate temperature rises in non-magnetic materials in a power transformer. The study is a continuation to a study conducted in 2006 where tests were made with different kinds of iron materials.

The test objects studied included different non-magnetic wall structures and non-magnetic box clamps that are used in a transformer core. Measurements similar to those made in 2006 were conducted so that the results would be comparative. This thesis is divided into two main themes. In the first part, transformer temperature rises and physical features of non-magnetic materials were investigated studying transformer theory. The second part contains analysis of laboratory tests.

There were five test objects and overall 40 measurements. Tests for all five test objects included temperature rise as a function of supply current, distance and frequency. The purpose of this investigation was to create mathematical models for calculating temperature rises by laboratory tests and computer calculation.

The most essential results were the mathematical model for dependence between temperature rise and current up to 10 kA, and mathematical model for dependence between temperature rise and frequency up to 250 Hz using non-magnetic materials. These mathematical models can be used in daily dimension tasks at the design stage.

Keywords Power Transformer, Temperature Rise, Non-magnetic

SISÄLLYS

ALKUSANAT	3
1 JOHDANTO	1
2 MUUNTAJAN LÄMPENEMISEEN LIITTYVÄT SÄHKÖMAGNEETTISET ILMIÖT	2
2.1 Maxwellin yhtälöt	2
2.1.1 Gaussin lait	3
2.1.2 Faradayn induktiolaki	4
2.1.3 Lenzin laki	4
2.1.4 Pyörrevirrat	4
2.1.5 Amperen laki + Maxwellin lisäys	5
2.2 Materiaalien vaikutus sähkö- ja magneettikenttään	6
2.2.1 Suhteellinen permittiivisyys	6
2.2.2 Suhteellinen permeabiliteetti	7
3 MUUNTAJAN LÄMPENEMINEN	9
3.1 Muuntajan lämpenemä	9
3.2 Tehohäviöt	10
3.2.1 Tyhjäkäyntihäviöt	11
3.2.2 Kuormitushäviöt	11
3.3 Lämpöenergian siirtymistavat	12
3.3.1 Konvektio	13
3.3.2 Johtuminen	13
3.3.3 Säteily	14
4 MUUNTAJAN METALLIOSIEN LÄMPENEMISKOKEET	16
4.1 Aikaisemmat kokeet	16
4.2 Laboratoriokokeet	16
4.2.1 Koelaitteisto	17
4.2.2 Testikappaleet	18
4.2.3 Lämpenemiskokeet	19
5 TIETOKONEMALLINNUS	20
5.1 Seinämän lämpenemä	20

5.1.1	Yhden kiskon aiheuttama lämpenemä	21
5.1.2	Kolmen kiskon aiheuttama lämpenemä	22
5.1.3	Austeniittiteräslevyn lämpenemän mallintaminen	22
6	LÄMPENEMISKOKEIDEN ANALYSOINTI.....	25
6.1	Suojaamaton epämagneettinen teräslevy kolmivaihekiskoston läheisyydessä	26
6.1.1	Virran vaikutus levyn lämpenemään	26
6.1.2	Johtimen ja levyn välisen etäisyyden vaikutus levyn lämpenemään	29
6.1.3	Taajuuden vaikutus levyn lämpenemään	31
6.2	Suojattu epämagneettinen teräslevy kolmivaihekiskoston läheisyydessä	32
6.2.1	Virran vaikutus levyn lämpenemään	34
6.2.2	Johtimen ja levyn välisen etäisyyden vaikutus levyn lämpenemään	35
6.2.3	Taajuuden vaikutus levyn lämpenemään	37
6.3	Puristuspaikat kolmivaihekiskostoon nähden samansuuntaisesti.....	39
6.3.1	Virran vaikutus paikkojen lämpenemään.....	40
6.3.2	Johtimien ja puristuspaikkojen välisen etäisyyden vaikutus paikkojen lämpenemään	45
6.3.3	Taajuuden vaikutus puristuspaikkojen lämpenemään	48
6.4	Puristuspaikat kolmivaihekiskostoon nähden poikittain.....	50
6.4.1	Virran vaikutus paikkojen lämpenemään.....	52
6.4.2	Johtimien ja puristuspaikkojen välisen etäisyyden vaikutus paikkojen lämpenemään	54
6.4.3	Taajuuden vaikutus paikkojen lämpenemään	56
7	YHTEENVETO	59
8	LÄHDELUETTELO	60
	LIITTEET	

LIITELUETTELO

- LIITE 1 Virtakiskosto, testikappaleet ja lämpötila-antureiden sijainnit
- LIITE 2 Mittausjärjestelyt
- LIITE 3 Mittaustulokset
- LIITE 4 Yhtälöiden johtaminen
- LIITE 5 Lämpötilajakaumat

1 JOHDANTO

Tehomuuntajan suurvirtajohtimia ympäröivä magneettikenttä aiheuttaa paikallisia häviökeskittymiä johtimien läheisyydessä olevissa metallirakenteissa. Tätä ilmiötä tutkittiin magneettisten rakenneosien osalta Janne Heinosen diplomityössä: ”Tehomuuntajan rautaosien lämpeneminen suurvirtajohtimien läheisyydessä, Tampereen Teknillinen Yliopisto 2006.” Tutkimatta jäivät kuitenkin epämagneettiset rakenneosat, kuten muuntajasäiliön seinäminä käytettävät suorat teräslevyt ja sydämen puristuspaikkeina käytettävät profiilit. Epämagneettisia rakenneosia käytetään varsinkin uuni- ja tasasuuntaajamuuntajissa, joiden kuormitusvirta on voimakkaasti yliaaltopitoinen. Epämagneettisen teräksen terminen käyttäytyminen korkeilla taajuuksilla on kyseenalainen, koska suuren resistiivisyyden takia teräksellä ei ole kuparin tai alumiinin pienen tunkeutumissyvyyden etua.

Muuntajien nimellistehojen kasvaessa on muuntajien koko sekä häviöteho pidettävä mahdollisimman pienenä. Eniten tehohäviöitä muuntajissa syntyy aktiivisissa osissa, kuten käämeissä, johtimissa ja rautasydämessä. Kuormituksessa nämä osat synnyttävät magneettikentän hajavuon, joka indusoi pyörrevirtoja muuntajien teräsrakenteisiin muodostaen niihin paikallisia lämpökeskittymiä.

Muuntajan häviöt voidaan jakaa kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöihin. Tyhjäkäynti eli rautahäviöt ovat hystereesi- ja pyörrehäviöitä, jotka aiheutuvat magneettivuon vaihtelusta rautasydämessä. Kuormitus- eli virtalämpöhäviöt syntyvät käämeissä virran vaikutuksesta. Tyhjäkäyntihäviöt riippuvat jännitteestä, mutta eivät kuormituksesta, joten niiden suuruus pysyy koko ajan vakiona.

Tässä työssä oli tarkoituksena selvittää miten epämagneettiset osat käyttäytyvät, kun etäisyys virtakiskoon, kuormitusvirran suuruus ja kuormitusvirran taajuus vaihtelevat. Vertailut tehtiin myös ratkaisuun, jossa epämagneettinen teräs suojattiin kuparilla. Tavoitteena oli myös johtaa käytännön suunnittelutyöhön tarvittavat laskukaavat laboratoriokokeiden ja tietokonelaskelmien avulla.

2 MUUNTAJAN LÄMPENEMISEEN LIITTYVÄT SÄHKÖ- MAGNEETTISET ILMIÖT

Muuntajien suunnittelussa yksi keskeisimmistä tehtävistä on niiden mitoittaminen siten, että lämpenemät eivät kohoa yli sallittujen rajojen. Muuntajien häviöt on optimoitava muuntajan koon, painon ja materiaalikustannusten suhteen. Nykyään lähes jokainen tehomuuntaja tehdään asiakkaan tarpeiden mukaisesti, jolloin jokainen muuntaja on suunniteltava erikseen. Häviöiden vähentämiseksi on ymmärrettävä häviöiden aiheuttajat ja eri häviötyypit. /4/

Käämien virran synnyttämä magneettivuo jaetaan päävuohon ja hajavuohon. Päävuo kulkee sekä ensiö- että toisiokäämin läpi. Ensiökäämin hajavuo ei kulje päävuon reittiä, vaan etsii aina vaihtoehdoisen reitin. Hajavuo voi kulkea pitkiäkin matkoja epämagneettisessa materiaalissa, jonka magneettivastus eli reluktanssi on paljon suurempi kuin rautasydämen. Tämän vuoksi hajavuo on päävuon rinnalla varsin vähäinen. Hajavuo vaikuttaa kuitenkin oleellisesti muuntajan ominaisuuksiin, sillä se ja tyhjäkäyntivirta määräävät muuntajan ensiökäämin hajainduktanssin. /12/

Tässä luvussa käydään läpi muuntajien lämpenemiseen johtavia sähkömagneettisia ilmiöitä.

2.1 Maxwellin yhtälöt

Sähkömagnetismin tutkimus huipentui James Clerk Maxwellin (1831-1879) luomaan Maxwellin yhtälöinä tunnettuun kenttäteoriaan, joka pystyy kuvaamaan kaikki tunnetut sähkömagneettiset ilmiöt ja niiden väliset vuorovaikutukset.

Maxwellin neljä yhtälöä kertovat sähkö- ja magneettikenttien yhteyden sähkövirtoihin ja sähkövarauksiin. Sähkö- ja magneettikentät ovat aaltoja, joiden nopeus on valonnopeus. Maxwellin yhtälöiden mukaan levossa oleva sähkövaraus luo ympärilleen sähkökentän, mutta ei magneettikenttää. Vakionopeudella liikkuva varaus synnyttää sekä sähkö- että magneettikentän. /4/, /7/, /9/

$$\nabla \cdot D = \rho \quad \text{Gaussin laki sähkökentille} \quad (2-1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad \text{Gaussin laki magneettikentille} \quad (2-2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \text{Faradayn induktiolaki} \quad (2-3)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad \text{Amperen laki+Maxwellin lisäys} \quad (2-4)$$

jossa	E	on sähkökentän voimakkuus
	D	on sähkökentän vuon tiheys
	H	on magneettikentän voimakkuus
	B	on magneettivuon tiheys
	J	on virtatiheys
	ρ	on varaustiheys

Yhtälöt 2-1 ja 2-2 kuvaavat muuttuvien sähkö- ja magneettikenttien välistä riippuvuutta. Yhtälöstä 2-1 saadaan selville kuinka sähkövaraus tuottaa sähkökentän ja yhtälöstä 2-2 kuinka magneettisia monopoleja ei ole olemassa. Yhtälöt 2-3 ja 2-4 kuvaavat muuttuvien sähkö- ja magneettikenttien välistä riippuvuutta. Yhtälöstä 2-3 nähdään, että muuttuva magneettikenttä tuottaa sähkökentän. Yhtälössä 2-4 ilmiö on päinvastainen, jolloin sähkövirta ja muuttuva sähkökenttä tuottavat magneettikentän.

2.1.1 Gaussin lait

Yleisesti Gaussin laki määrittää suljetun pinnan sisällä olevien vektorikentän lähteiden sekä pinnan läpi kulkevan vektorivuon välistä yhteyttä. Gaussin lait eritellään sähkö- ja magneettikentille. Yhtälö 2-1 kuvaa staattista sähkökenttää. Gauss esitti, että suljetun pinnan läpi virtaavien kenttäviivojen joukko muodostaa sähkö-

vuon, joka on sama kuin pinnan sisään jäävä kokonaisvaraus. Sähkövaraukset ovat sähkökentän lähde. /4/, /6/

Gaussin laki magneettikentille kertoo, että magneettivuo suljetun pinnan läpi saadaan laskemalla pinnan sisäänsä sulkemien magneettisten napojen voimakkuuksien summa. Kuten yhtälöstä 2-2 nähdään, on magneettikentän divergenssi nolla eli kenttä on lähteetön. Magneettiset kenttäviivat muodostavat aina suljettuja silmuja eli kenttäviivat palaavat aina lähtöpisteeseen. /6/, /11/

2.1.2 Faradayn induktiolaki

Michael Faraday havaitsi, että liikkuvan magneetin avulla saatiin sähkövirta kulkemaan johtimessa. Sähkövirran aiheutti silmukkaan indusoitunut sähkömotorinen voima, jonka suuruus riippuu silmukan pinta-alasta ja silmukan lävistävästä magneettivuon tiheydestä. Syntynyttä sähkövirtaa sanotaan induktiovirraksi. Indusoitunut lähdejännite on verrannollinen silmukan läpi kulkevan magneettivuon muutosnopeuteen $\delta B/\delta t$. Yhtälössä 2-3 oleva miinusmerkki viittaa induktiojännitteen suuntaan ja se ilmaisee Lenzin lain eli induktiovirta vastustaa muutosta joka sen aiheuttaa. /4/, /6/

2.1.3 Lenzin laki

Lenzin lain mukaan indusoituneen jännitteen aiheuttama sähkövirran suunta on sen aiheuttajaa vastaan. Lain mukaan heikkenevä ulkoinen magneettikenttä synnyttää induktiovirran, joka synnyttää alkuperäisen magneettikentän suuntaisen kentän ja alkuperäinen kenttä vahvistuu. Toisaalta taas vahvistuva magneettikenttä synnyttää induktiovirran, jonka magneettikenttä heikentää alkuperäistä kenttää. Induktiovirran suunta on aina sellainen, että se pyrkii etsimään sen muutoksen, joka virran on aiheuttanut. /4/, /11/

2.1.4 Pyörrevirrat

Johdinsilmukan läpi kulkeva magneettivuon muutos indusoi jännitteen ja sähkövirran suljettuun virtapiiriin. Kun johtavan kappaleen läpi kulkeva magneettivuo muuttuu, tähän kappaleeseen indusoituu lähdejännite ja virtoja, joita sanotaan

pyörrevirroiksi. Lenzin lain perusteella pyörrevirtojen suunnan täytyy olla sellainen, että niiden aiheuttama magneettikenttä vastustaa magneettivuon kasvamista, jolloin pyörrevirtojen suunta on myötöpäivään. Pyörrevirtojen muodostuminen on yleensä haitallinen ilmiö, koska se aiheuttaa aina energian muuttumista vähempiarvoiseen muotoon, tässä tapauksessa lämmöksi. /3/

Muuntajissa pyörrevirrat aiheuttavat energiahäviöitä lämmittämällä muuntajan sydänmateriaalia sekä aiheuttamalla vastakkaisuuntaisen sähkömotorisen voiman muuntajan käämeihin. Häviöitä voidaan minimoida rakentamalla sydän toisistaan eristetyistä levyistä yhtenäisen sydänmateriaalin sijaan. Pyörrevirrat aiheuttavat myös johtimiin virran epätasaisen jakautumisen poikkipinnassa. Johtimen aiheuttama häviöteho keskittyy yleensä pienelle alueelle, jolloin tehoteho saattaa muodostua hyvin suureksi. Suurten paikallisten tehotehoerojen vuoksi rakenteisiin muodostuu potentiaalieroja, jotka pyrkivät tasoittumaan rakenteissa kiertävien pyörrevirtojen avulla. Kiertävät pyörrevirrat aiheuttavat resistiivisiä häviöitä, joita voidaan vähentää suojaamalla säiliö hyvin sähköä johtavalla epämagneettisella materiaalilla. Muuntajan kuoreen pyörrevirrat muodostavat kuumia pisteitä. Kuumaksi pisteeksi sanotaan kohtaa, jossa lämpötila on ympäristön lämpötilaa korkeampi. /4/, /9/

2.1.5 Amperen laki + Maxwellin lisäys

Amperen laki liitti toisiinsa sähkövirran ja sen tuottaman magneettikentän voimakkuuden. Yhtälö 2-4 kuvaa suljettuna silmukkana kulkevan magneettikentän ja silmukan läpi kulkevan sähkövirran välisen yhteyden. Amperen lain mukaan on helppo laskea magneettikentän voimakkuus symmetrisissä tapauksissa. Maxwell havaitsi ristiriitaisuuden laissa soveltaessaan Amperen lakia varautuvaan kondensaattoriin ja laajensi sen merkitystä lisäämällä siihen yhden virtatermin, joka on nimeltään siirtymävirta. Näin Maxwell oivalsi, että sähkökentän muutokseen liittyy aina magneettikentän siirtyminen. /7/, /11/

2.2 Materiaalien vaikutus sähkö- ja magneettikenttään

Materiaalit voidaan jakaa sähköisten ja magneettisten ominaisuuksien puolesta eri kategorioihin. Sähköisten ominaisuuksien perusteella materiaalit jaetaan johteisiin, puolijohteisiin ja eristeisiin. Magneettisten ominaisuuksien perusteella materiaalit voidaan jakaa magneettisiin ja epämagneettisiin materiaaleihin. Kaikilla aineilla on sähköisiä ominaisuuksia. Sähköisiä ominaisuuksia kuvataan suhteellisella permittiivisyydellä ja magneettisia ominaisuuksia suhteellisella permeabilitetilla. /4/

Materiaaliyhtälöillä voidaan osoittaa kenttien ja vuontiheyksien välinen yhteys. Yhtälöissä käytetään materiaaleille ominaisia kertoimia. Magneettikentän kerroin on permeabiliteetti μ , joka kuvaa aineen magneettista käyttäytymistä. Sähkökentän kertoimena käytetään aineen permittiivisyyttä ϵ . Permittiivisyys kuvaa miten väliaine vaikuttaa siihen kohdistuvaan sähkökenttään. /6/

Aineiden magneettisia ominaisuuksia kuvataan magnetoimiskäyrillä. Hystereesi-ilmiö aiheutuu domainalueiden välisestä kitkasta. Hystereesi-ilmiöstä aiheutuu hystereesihäviöitä, joiden suuruus on verrannollinen hystereesisilmukan pinta-alaan. /6/

Aineet joihin magneettikentillä on mitätön vaikutus, ovat epämagneettisia aineita. Epämagneettisessa aineessa ei ole hystereesihäviöitä aiheuttavia magneettisia dipoleita, jolloin siinä syntyvät häviöt ovat magneettista materiaalia pienemmät.

2.2.1 Suhteellinen permittiivisyys

Permittiivisyys on suure, joka kuvaa miten väliaine vaikuttaa siihen kohdistuvaan sähkökenttään. Väliaineen permittiivisyys ϵ on suhteellisen permittisyyden ja tyhjiön permittisyyden tulo, joka nähdään yhtälöstä 2-5. Tyhjiön permittiivisyys on vakio ja sen arvo on yksi.

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (2-5)$$

jossa ε on väliaineen permittiivisyys
 ε_r on suhteellinen permittiivisyys
 ε_0 on tyhjiön permittiivisyys

Kun materiaali tuodaan sähkökenttään, sen sisälle muodostuu sähkökenttä, joka pyrkii kumoamaan ulkoista sähkökenttää. Suhteellinen permittiivisyys kuvaa väliaineen permittivisyyden suhteessa tyhjiön permittiivisyyteen. Aine, jonka suhteellinen permittiivisyys on suuri, heikentää sähkökenttää enemmän kuin aine, jonka suhteellinen permittiivisyys on pieni. /6/

Suhteellisen permittiivisyyden avulla aineet voidaan jakaa johteisiin, eristeisiin ja puolijohteisiin. Hyvillä johteilla sisäinen sähkökenttä on lähes yhtä suuri kuin ulkoinen, jolloin niiden välinen suhde on lähes yksi tai pienempi. Eristemateriaaleilla sisäinen sähkökenttä on ulkoista sähkökenttää pienempi ja siten suhteellinen permittiivisyys on suurempi kuin yksi. Puolijohteet muuttuvat ulkoisen sähkökentän voimakkuuden mukaan. Pienillä sähkökentän voimakkuuksilla puolijohde toimii eristeenä ja suurilla voimakkuuksilla johteena. /4/

2.2.2 Suhteellinen permeabiliteetti

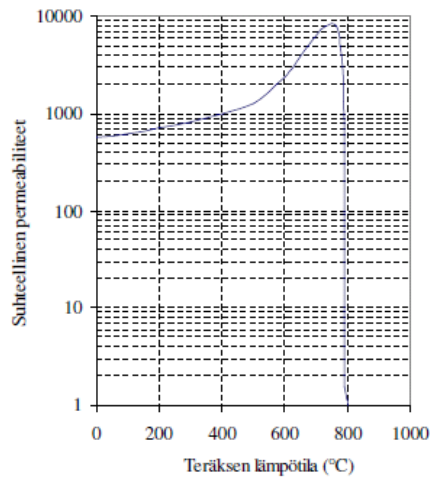
Permeabiliteetti on aineen magneettista käyttäytymistä kuvaava suure. Magneettista voimaa kuvataan samalla tavalla kuin sähkökenttienkin. Väliaineen permeabiliteetti voidaan lausua suhteellisen ja tyhjiön permeabiliteetin avulla yhtälöllä 2-6. Tyhjiön permeabiliteetti on vakio ja yksikötön suhdeluku. /6/

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (2-6)$$

jossa μ on väliaineen permeabiliteetti
 μ_r on suhteellinen permeabiliteetti
 μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti

Suhteellinen permeabiliteetti kertoo aineen permeabiliteetin suhteessa tyhjiön permeabiliteettiin. Suhteellisen permeabiliteetin avulla aineet voidaan jakaa paramagneettisiin, diamagneettisiin ja ferromagneettisiin aineisiin. Paramagneettiset materiaalit vahvistavat ulkoista magneettikenttää ja niiden permeabiliteetti on suurempi kuin yksi. Diamagneettiset aineet ovat magneettikenttää heikentäviä materiaaleja ja niiden permeabiliteetti on pienempi kuin yksi. /4/, /6/

Ferromagneettisilla aineilla on voimakkaasti magneettikenttää voimistava vaikutus. Tämän vuoksi ne soveltuvat hyvin muuntajan rautasydämeen. Ferromagneettien permeabiliteetti on huomattavasti suurempi kuin yksi ja niiden sisäinen magneettikenttä kasvaa herkästi ulkoisen kentän mukana. Ferromagneettiset materiaalit voivat kuitenkin muuttua paramagneettisiksi niiden lämpötilan ylittäessä Curie-pisteen. Curie-pistettä korkeammassa lämpötilassa aine menettää magneettisuutensa. Kuvasta 1 nähdään että teräksen Curie-lämpötila on noin 770 °C. /4/



Kuva 1 Teräksen suhteellinen permeabiliteetti lämpötilan funktiona.

3 MUUNTAJAN LÄMPENEMINEN

Sähkömagneettisten ilmiöiden lisäksi muuntajan lämpenemiseen vaikuttaa myös muita tekijöitä. Sähkömagneettisten ilmiöiden seurauksena muuntajan rakenteissa syntyy erilaisia tehohäviöitä, jotka lämmittävät muuntajaa. Syntyvä lämpö on johdettava ympäröivään ilmaan. Lämpöenergia voi siirtyä konvektiolla, johtumalla tai säteilemällä.

Suurimmat lämpöhäviöt syntyvät yleensä muuntajan alajännitepuolen virtakiskoston läpivientikohdissa. Näissä kohdissa virta on suurempi ja magneettikenttä voimakkaampi kuin esimerkiksi muuntajan yläjännitepuolen virtakiskoton läpivientikohdissa. /4/

Muuntajan lämpenemiseen liittyvät ilmiöt on hyvä tuntea muuntajia suunnitellessa. Tässä kappaleessa käsitellään lämpenemistä aiheuttavia häviöitä sekä yleisimmät lämmön siirtymistavat. Lämpöopin tuntemisesta oli hyötyä tämän opinnäytetyön mittaus-, sekä analysointivaiheessa.

3.1 Muuntajan lämpenemä

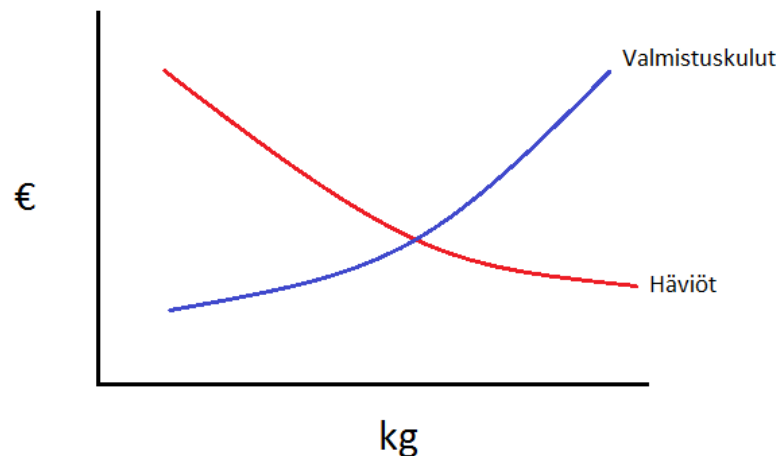
Ensisijaisena mitoituksparametrinä lämpenemän suhteen käytetään käämin kuumimman kohdan eli hot-spotin lämpenemää. IEC-standardin mukaiset parametrit ovat huippuöljyn lämpenemä ja käämin keskimääräinen lämpenemä. Huippuöljyn lämpenemällä tarkoitetaan muuntajan yläosassa tai katon rajassa olevan öljyn lämpenemää. Lämpenemän yksikkönä käytetään Kelvin-asteita ja standardin mukaan huippuöljyn lämpenemä saa olla enintään 60 K ja käämin keskimääräinen lämpenemä 65 K, kun normaalilämpötilana pidetään 20 °C. /2/

Käytännössä lämpenemän rajat määrittävät muuntajan elinikään vaikuttavan öljyn lämpenemän mukaan. Lämpenemä mitataan muuntajan kannen alta, mistä saadaan huippuöljyn lämpötila. Öljyn vanhenemisen raja-arvona pidetään 80 °C ja sitä suuremmilla lämpötiloilla öljyn elinikä lyhenee puolella jokaista 10 °C kohden. Standardeissa sallitut huippuöljyn lämpötilat määritellään kuitenkin muuntajaa ympäröivän lämpötilan mukaan, jolloin rajat vaihtelevat eri maissa. IEC-

standardin mukaan ympäristön lämpötilan ollessa maksimissaan 40 °C, sallittu huippuöljyn lämpenemä on 60 °C. /2/, /4/

3.2 Tehohäviöt

Muuntajat ovat hyötysuhteeltaan tehokkaita laitteita. ABB:n muuntajissa häviöiden osuus on tyypillisesti noin 0,5 – 1 % nimellistehosta, jolloin hyötysuhteeksi saadaan noin 99 – 99,5 %. Häviöt muuttuvat lämmöksi ja siten sähköenergiaa menee hukkaan. Tämän seurauksena muuntaja, jossa on suuret häviöt aiheuttaa taloudellisia menetyksiä käyttäjälle. Toisaalta häviöiden pienentäminen aiheuttaa muuntajaan suuremmat materiaalikustannukset. /2/



Kuva 2 Periaatekuva muuntajan valmistuskulujen ja häviöiden suhteesta painoon ja hintaan.

Kuvasta 1 nähdään kuinka muuntajan valmistuskulut ja häviöt vaihtelevat painon tai materiaalin käytön suhteen. Valmistuskulut kasvavat, kun muuntajan massa kasvaa, kun taas häviöt pienenevät. /1/

Eniten tehohäviöitä muuntajassa syntyy sen aktiivisissa osissa. Mitä suuremmaksi muuntajan koko nousee sitä suuremmaksi nousee myös häviöiden aiheuttama lämpöteho. Lämpenemiset ilmaantuvat yleensä varsin pienille alueille luoden muuntajaan kuumia pisteitä. Kuumat pisteet nopeuttavat eristeiden vanhenemista

ja voivat pahimmillaan aiheuttaa läpilyönnin eristeessä. Kuumia pisteitä syntyy yleensä muuntajan sydämessä, käämeissä, muuntajaöljyssä tai muuntajan kuoresa. /4/

Häviöt voidaan jakaa tyhjäkäyntihäviöihin ja kuormitushäviöihin. Epänormaalit käyttöolosuhteet tai vikatilanteet saattavat kasvattaa molempia huomattavasti.

3.2.1 Tyhjäkäyntihäviöt

Tyhjäkäynti- eli rautahäviöt ovat hystereesi- ja pyörrevirtahäviöitä, jotka aiheutuvat magneettivuon vaihtelusta muuntajan rautasydämessä. Tyhjäkäyntihäviöt ovat riippuvaisia muuntajan koosta ja rakenteesta. Ne myös riippuvat jännitteestä, mutta ei kuormituksesta, joten häviöiden suuruus pysyy koko ajan vakiona. Tyhjäkäyntihäviöt riippuvat jännitteen lisäksi myös taajuudesta. Tämän vuoksi yliaallot kasvattavat tyhjäkäyntihäviöitä. /3/, /4/, /13/

Tyhjäkäyntihäviöitä syntyy, kun muuntajan ensiökäämiin kytketään jännite ja toisiokäämi on jätetty avoimeksi. Ensiökäämissä häviötä aiheuttaa tyhjäkäyntivirta ja rautasydämessä häviötä aiheuttaa muuttuvan magneettivuon synnyttämät hajavuot ja pyörrevirrat. Tyhjäkäyntihäviö on verrannollinen ensiökäämin jännitteeseen ja kasvaa nopeasti, jos muuntajaa käytetään yli nimellisjännitteen. Tyhjäkäyntihäviöitä voidaan pienentää valitsemalla parempia materiaaleja sydänmateriaaleiksi tai käyttämällä parempaa sydämen rakennetta, kuten valmistaa sydän kerrostetuista, ohuista toisistaan eristetyistä rautalevyistä. /3/, /4/, /5/

3.2.2 Kuormitushäviöt

Pääosa kuormitushäviöistä on resistanssissa syntyviä virtalämpöhäviöitä. Muuntajan häviöistä ne muodostavat suurimman osan, sillä ne ovat muuntajan koosta riippuen moninkertaiset tyhjäkäyntihäviöihin verrattuna. Ne voidaan jakaa kuparihäviöihin ja hajavuon aiheuttamiin lisähäviöihin. Kuparihäviöitä ovat kaikki resistanssin aiheuttamat häviöt ja lisähäviöihin kuuluu muut kuormavirran aiheuttamat häviöt, kuten virtajohtimien läheisyydessä olevien metalliosien lämpenemisen. Valtaosa kuormitushäviöistä koostuu juuri kuparihäviöistä. Ne ovat riippuvaisia käämien virrasta ja taajuudesta. /4/

Suurivirtaisissa käämeissä johdin jaetaan useampaan osajohtimeen häviöiden pienentämiseksi. Osajohtimet laitetaan risteilemään keskenään, millä pyritään siihen, että kukin johdin on keskimäärin yhtä voimakkaassa magneettikentässä yhtä pitkän matkan. /2/

Häviöt jokaisessa käämissä vastaa resistanssia kerrottuna sen läpi kulkevan virran neliöllä. Kuparihäviöt voidaan siis laskea yksinkertaisesti kaavalla I^2R . Käytännössä on todettu, että jos järjestelmässä on paljon yliaaltoja, pitäisi muuntajan kuormitusta vähentää noin 20-30 % nimellisestä, ettei muuntaja ylikuumentuisi. Yliaallot aiheuttavat muuntajissa ylimääräisiä häviöitä ja lisälämpenemisiä, millä on merkitystä muuntajan ikään, varsinkin jos yliaaltojen osuus on suuri. Alhaisella kuormitusasteella kuormitushäviöiden merkitys kuitenkin pienenee. /3/, /8/, /10/

Häviöiden pienentäminen vaatii yleensä lisää tai parempia materiaaleja ja parempia teknisiä ratkaisuja. Se myös nostaa helposti muuntajan hintaa.

3.3 Lämpöenergian siirtymistavat

Lämmön siirtyminen on lämpöenergian välittymistä eri lämpötiloissa olevien kappaleiden välillä. Tämä tapahtuu aina lämpöeroja tasoittavasti kuumemmasta kappaleesta kylmempään. Energian siirto on aina sitä tehokkaampaa mitä suurempi on lämpötilaero. Lämmön siirtyminen voi tapahtua johtumalla, konvektiolla tai säteilemällä. Muuntajassa lämpö siirtyy konvektiolla öljyn välityksellä käämikätkenteistä säiliön reunalle. Säiliön sisäreunalta lämpö johtuu ulkoreunalle ja siitä konvektiolla ympäristöön. Muuntajissa lämmön siirtämiseen käytetty väliaine on normaalisti joko ilma tai öljy. /4/

Lämpöenergian siirtymiseen vaikuttaa oleellisesti materiaaleille ominainen lämpöresistiivisyys. Konvektiossa ja johtumisessa lämpöresistiivisyyteen vaikuttaa materiaalin ominaisuudet ja säteilyssä säteilevän pinnan ominaisuudet. Nämä resistiivisyydet voidaan laskea yhteen, jolloin saadaan kokonaislämpöresistiivisyys. Muuntajassa kokonaislämpöresistiivisyys voidaan jakaa muuntajan sisäiseen ja ulkoiseen lämpöresistiivisyyteen. /4/, /7/

Myös muuntajan maalatulla pinnalla on merkitystä. Kaikkien maalattujen pintojen emissiivisyys kaikilla väreillä on noin 0,9. Kirkkaan metallin emissiivisyys on noin 0,1. Näitä jälkimmäisiä pintoja tulisi välttää, kun vaaditaan hyvää lämmön-siirtoa. /3/

3.3.1 Konvektio

Nesteet ja kaasut eivät yleisesti ole kovin hyviä lämmönjohteita. Ne voivat kuitenkin siirtää lämpöenergiaa nopeasti kuljetuksen avulla. Konvektio on prosessi, jossa lämpöenergia siirretään virtaamaan pääsevän aineen mukana paikasta toiseen. Lämmenneen aineen tiheys pienenee lämpölaajenemisen seurauksena ja neste tai kaasu nousee ylöspäin. Ylöspäin nousseen aineen tilalle tulee viileämpää ainetta, joka jäähtyy lämpölähteen pintaa. /7/

Konvektion erikoistapaus on pakotettu konvektio, jossa lämmenneiden kaasu- tai nestemolekyylin liikettä tehostetaan potkurilla tai tuulettimella. Konvektiolla saavutetaan kaikkein tehokkain tapa siirtää lämpöä. Konvektion aiheuttama lämmönsiirto on varsin mutkikas tapahtuma, minkä kuvaamiseen ei ole yksinkertaista yhtälöä. Konvektiolla siirtyvä lämpöteho voidaan kuitenkin laskea kaavalla 3-1. Konvektiosta johtuva lämpövirta on suoraan verrannollinen pinta-alaan. /7/

$$q = kA\Delta T, \quad (3-1)$$

jossa	q	on lämpöteho
	k	on konvektiokerroin
	A	on tarkasteltava pinta-ala
	ΔT	on tarkasteltavien pisteiden lämpötilaero

3.3.2 Johtuminen

Johtumisella tarkoitetaan lämmön siirtymistä aineen sisällä. Lämpö voi siirtyä johtumalla myös aineesta toiseen, jos ne ovat kosketuksissa toisiinsa. Lämpö siirtyy johtumisessa aina korkeammasta matalampaan lämpötilaan siten, että lämpöti-

laerot pyrkivät tasoittumaan. Lämmön johtumista mitataan lämpöresistanssilla tai sen käänteisarvolla lämmönjohtavuudella.

Lämpöenergian siirtymisen nopeus riippuu aineen ominaisuuksista ja sen edellytyksenä on lämpötilaeron olemassaolo. Metallit ovat hyviä lämmönjohteita, sillä niissä on paljon vapaita elektroneja jotka voivat kuljettaa energiaa etäälle. Johtamalla siirtyvä lämpöteho aineen sisällä voidaan laskea kaavalla 3-2. /4/, /7/

$$q = -\lambda A \frac{\Delta T}{d}, \quad (3-2)$$

jossa	q	on lämpöteho
	λ	on aineen lämmönjohtavuus
	A	on aineen pinta-ala
	ΔT	on tarkasteltavien pisteiden lämpötilaero
	d	on ainekerroksen paksuus

3.3.3 Säteily

Kaikki kappaleet lähettävät pinnaltaan, eli emittoivat jatkuvasti energiaa sähkömagneettisena säteilynä. Tämä energia on peräisin atomien ja molekyylien lämpöliikkeestä. Säteily eroaa muista lämmön siirtymistavoista siinä, ettei siirtymiseen tarvita väliainetta. Lämpösäteilyllä on suuri merkitys lämmönsiirrossa korkeissa lämpötiloissa, joissa säteilyn merkitys on suurempi kuin johtumisen tai konvektion. Kaavasta 3-3 nähdään, että säteilyvoimakkuus on verrannollinen termodynaamisen lämpötilan T neljänteen potenssiin. /7/

$$q = \varepsilon\sigma A(T^4 - T_0^4), \quad (3-3)$$

jossa	q	on lämpöteho
	ε	on pinnan emissiivisyys
	σ	on Stefan-Bolzmännin vakio
	T	on kappaleen lämpötila
	T_0	on ympäristön lämpötila

4 MUUNTAJAN METALLIOSIEN LÄMPENEMISKOKEET

Tämän työn käytännön osuus perustuu laboratoriossa tehtyihin lämpenemiskokeisiin, joita tuettiin tietokoneella tehtyihin laskelmiin ACE- ohjelmalla. Aiemmin muuntajan lämpenemistä on tutkittu 50- ja 60-luvulla Oy Strömberg Ab:n ja General Electricin toimesta. Testeissä käytetyt virrat ovat kuitenkin nykymittapuun mukaan liian pieniä ja taajuuden muutoksen vaihteluita ei ollut otettu huomioon. Edelliset käytännön testit tehtiin vuonna 2006 Janne Heinosen tutkiessa muuntajan rautaosien lämpenemistä suurvirtakiskoston läheisyydessä. Janne Heinosen työ keskittyi muuntajan rautaosien ja läpivientiaukkojen lämpenemiseen. Tässä työssä jatkettiin tutkimusta tekemällä mittaukset epämagneettisella teräksellä.

4.1 Aikaisemmat kokeet

Vuonna 1959 Oy Strömberg Ab:n testeissä tutkittiin pyörrevirtahäviöistä johtuvia lisähäviöitä muuntajan läpivientien läheisyydessä ja vuonna 1964 läpivientivirran, kansilevyn paksuuden ja läpivientiaukon halkaisijan vaikutusta kannen lämpenemään. Näiden testien perusteella tehtiin vuonna 1965 ohjeet sallituille läpivientivirroille eri kansirakenteilla.

General Electric tutki vuonna 1954 kannen lämpenemää erilaisilla läpivientirakenteilla. Testikappaleet olivat periaatteeltaan Oy Strömberg Ab:n testejä vastaavia ja myös testien tulokset olivat hyvin samankaltaiset.

Vuonna 2006 lämpenemistä tutkittiin Janne Heinosen diplomityössä, jossa tutkittiin tehomuuntajan rautaosien lämpenemistä suurvirtajohtimien läheisyydessä. Työn tavoitteena oli laboratoriotestien ja tietokonelaskelmien avulla löytää matemaattiset mallit lämpenemän laskemiseksi. Tuloksiksi testeistä saatiin säiliön lämpenemän ja virran välinen riippuvuus 25 kA virtaan asti sekä lämpenemän ja taajuuden välinen riippuvuus 250 Hz taajuuteen asti.

4.2 Laboratoriokokeet

Laboratoriokokeet suoritettiin ABB Electrotest Oy suurjännitelaboratoriossa. Laboratorio on erikoistunut tyyppi- ja kappalekokeiden testaamiseen ja sen käytössä

on kaikki IEC-standardit. Kokeet suoritettiin mahdollisimman samankaltaisesti kuin vuonna 2006 Janne Heinosen diplomityössä, jotta saataisiin vertailukelpoisia tuloksia. Testikappaleiden lämpenemää tutkittiin yhteensä 40 mittauksen avulla. Testikappaleille tehtiin mittaukset neljällä virralla, etäisyydellä ja taajuudella. Kappaleet I ja II mitattiin erikseen ja kappaleet III, IV ja V yhtäaikaisesti.

4.2.1 Koelaitteisto

Koelaitteisto koostui muuntajasta, virtakiskoista sekä lämmitettävistä koekappaleista. Kuvasta 3 näkee, että virtakiskosto koostui kolmesta vaakasuoraan asennetusta kiskonipusta, jossa jokaisessa nipussa oli kolme 10×100 mm kuparikiskoa. Kiskojen välinen etäisyys nipuissa oli 20 mm ja vaihejohtimien välinen etäisyys nipun keskeltä mitattuna oli 800 mm. Yhden vaihejohtimen leveys reunimmaisista kiskoista mitattuna oli 150 mm. Virtakiskosto oli oikosuljettu, jolloin testit suoritettiin tähtikytkennässä.



Kuva 3 Mittauksia varten rakennettu virtakiskosto. Yksi vaihe koostui kahdesta osakiskostosta. Osakiskojen välinen etäisyys on 150 mm ja vaiheiden välinen etäisyys osakiskojen keskivälistä mitattuna 800 mm.

Testikappaleina käytettiin 2000×3000 mm teräslevyjä ja 2000×425 mm sekä 2000×442 mm puristusalkkeja. Teräslevyjä pidettiin virtakiskojen läheisyydessä pystysuorassa nosturin avulla. Puristusalkkeille suoritettiin kahdet eri testit, ensimmäisessä alkit asetettiin samansuuntaisesti vaihekiskojen kanssa ja toisessa poikittain vaihekiskoihin nähden. Testikappaleiden ja lattian väliin jätettiin 200 mm rako ilmankiertoa varten. Puristusalkkien lämpenemistestejä varten rakennettiin erillinen teline, jotta kaikki kolme kappaletta saataisiin mitattua samanaikaisesti.

Levyjen lämpenemä mitattiin lämpötila-antureilla, jotka asetettiin seuraavasti: ensimmäisessä testissä kappaleelle I asetettiin 41 anturia tasavälein 75 mm välein samalla puolella kuin vaihekiskot. Testikappaleeseen II lämpötila-antureita asetettiin 15 kpl kuparisuojan keskelle, 15 kpl suojan reunalle, 15 kpl teräslevyyn 150 mm päähän levyn reunasta ja 15 kpl suojan vastakkaiselle puolelle teräslevyyn. Testikappaleihin III, IV ja V antureita asetettiin puristusalkin toisen pään ja keskustan ympärille 13 kpl, jolloin kokonaismääräksi tuli 78 kpl. Mittauksia otettiin viiden minuutin välein ja tulokset talletettiin tietokoneelle. Liitteessä 1 on kuvattu mittauksissa käytetty virtakiskosto sekä eri testikappaleet. Myös lämpötila-antureiden sijoituspaikat on kuvattu samassa liitteessä.

4.2.2 Testikappaleet

- I suojaamaton 10 mm epämagneettinen austeniittiteräslevy
- II 10 mm epämagneettinen austeniittiteräslevy, johon hitsattu 4 mm suoja kuparilevystä. Teräslevyn reunasta jätetty 300 mm suojaamatta
- III 2000 mm puristusalkki magneettista terästä. Alkki on suojattu 4 mm kuparilla
- IV 2000 mm puristusalkki epämagneettista austeniittiterästä
- V standardin mukainen epämagneettinen 2000 mm LDT-puristusalkki.

4.2.3 Lämpenemiskokeet

Virtaa syötettiin kunnes testikappaleiden lämpötila ei enää muuttunut ja tasapaino-tila oli saavutettu. Myös ympäröivän tilan lämpötilaa mitattiin, jotta lämpenemä saataisiin laskettua. Ilmankierto kohteen ympärillä pidettiin häiriöttömänä. Ympäröivän ilman lämpötila-anturit asetettiin noin kahden metrin päähän lämmitettävästä levystä. Mittaustuloksiin talletettiin myös aika, josta saatiin tasapainotilaan pääsemiseen tarvittava aika. Kaikki lämpötilat ja ympäröivän ilman lämpötilat talletettiin, kun testikappale oli saavuttanut tasaisen tilan.

Kaikista testikappaleista otettiin tulokset lämpötilan noususta syöttövirran funktiona, etäisyyden funktiona ja taajuuden funktiona. Liitteessä 2 on kuvattu testikappaleiden sijoittelu virtakiskoihin nähden eri testeillä.

Lämpenemiskokeita tehtiin yhteensä 40 kappaletta. Ensimmäisestä ja toisesta testikappaleesta mitattiin lämpenemä virran, etäisyyden ja taajuuden suhteen erikseen. Loput testikappaleet mitattiin samanaikaisesti samoilla parametreilla.

5 TIETOKONEMALLINNUS

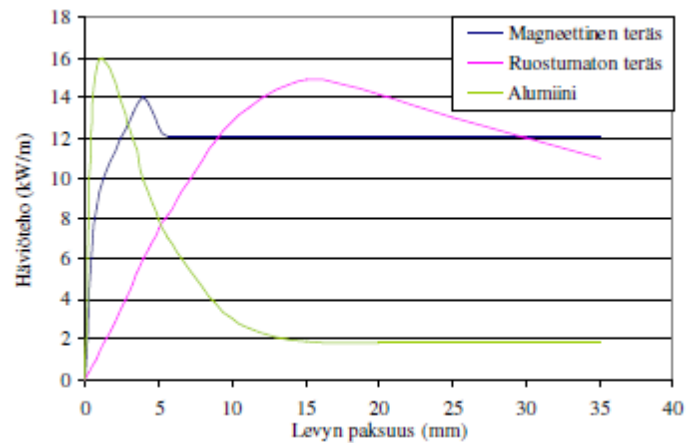
Hajavoiden laskeminen on muuntajissa monimutkaista. Muuntajat ovat tyypillisesti epäsymmetrisiä ja kolmiulotteisia, joten pelkästään analyttisiin menetelmiin perustuvalla mallinnuksella ei aina saada tarvittavia tuloksia. Geometrian lisäksi laskentaa vaikeuttaa magneettikentän epälineaarisuus ja vaikeus määrittää hajakenttiä nopeasti ja täsmällisesti. Tietokoneen avulla voidaan kuitenkin nykyään mallintaa numeerisesti monimutkaisempiakin järjestelmiä. Ehkä tyypillisin tällainen analyysin muoto on FEM-laskenta, jossa mallinnettava kappale jaetaan pieniin osiin, elementteihin, jotka kyetään yksitellen analysoimaan helpommin kuin monimutkainen kappale. Tietokoneen avulla useiden pienten osien analyysien tulokset voidaan kerätä yhteen, jolloin saadaan tulokset näkymään koko analysoitavan kappaleen kannalta. /1/

Tässä työssä käytettiin tietokonemallinnuksessa apuna Ace-ohjelmaa, jolla voitiin mallintaa kappaleita 2-ulotteisesti. Tämän vuoksi ainoastaan seinämien lämpenemää oli mahdollista tutkia. Ohjelmalla pystytään myös mallintamaan tapauksia, joita ei laboratoriossa voida toteuttaa, kuten lämpenemät yli 10 kA virroilla. Tässä työssä tietokonelaskelmia käytettiin hyväksi suojaamattoman austeniittiteräslevyn lämpenemän mallintamisessa.

5.1 Seinämän lämpenemä

Muuntajan seinämän kanssa samansuuntainen johdin aiheuttaa magneettikentän, joka synnyttää pyörrevirtoja seinämälevyn pinnalle. Lenzin lain mukaan samansuuntainen virtajohdin aiheuttaa peilivirran metallilevyyn, joka aiheuttaa häviöitä seinämässä. Pienillä virtakiskon ja seinämän etäisyyksillä peilivirta saattaa muodostua yhtä suureksi kuin johtimessa kulkeva virta. Tämän vuoksi peilivirran aiheuttamat häviöt ja lämpenemät saattavat olla suuria.

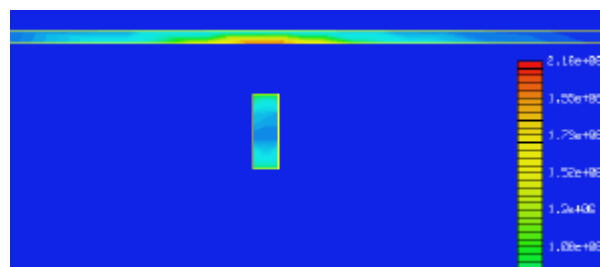
Johtimen ja levyn välisen etäisyyden sekä virran lisäksi levyn lämpenemään vaikuttaa myös levyn paksuus. Kuvassa 4 on esitetty kuvaajat, joista nähdään levyn paksuuden vaikutus magneettisessa teräksessä, ruostumattomassa teräksessä ja alumiinissa muodostuviin häviöihin.



Kuva 4 Levyn paksuuden vaikutus levyssä muodostuvaan tehohäviöön, kun materiaalina on magneettinen teräs, ruostumaton teräs ja alumiini.

5.1.1 Yhden kiskon aiheuttama lämpenemä

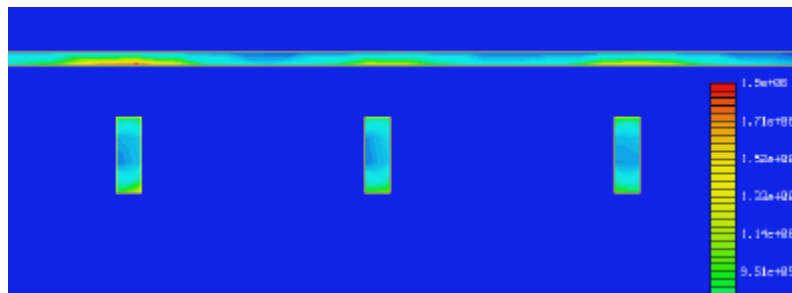
Kuvasta 5 nähdään, että yksi kisko aiheuttaa suurimman lämpenemän seinämään siihen kohtaan, jossa etäisyys kiskoon on kaikista pienin. Syöttövirta synnyttää levyyn vastakkaisuuntaisen peilivirran, joka kiertää levyn pinnalla. Kaukana toisistaan olevia kiskoja voidaan ajatella yhden kiskon tapauksena, koska muiden kiskojen vaikutus on melko pieni.



Kuva 5 ACE-ohjelmalla mallinnettu kuva yhden kiskon aiheuttamasta häviökeskittymästä. Kiskon virta on 5 kA ja etäisyys levystä 40 mm.

5.1.2 Kolmen kiskon aiheuttama lämpenemä

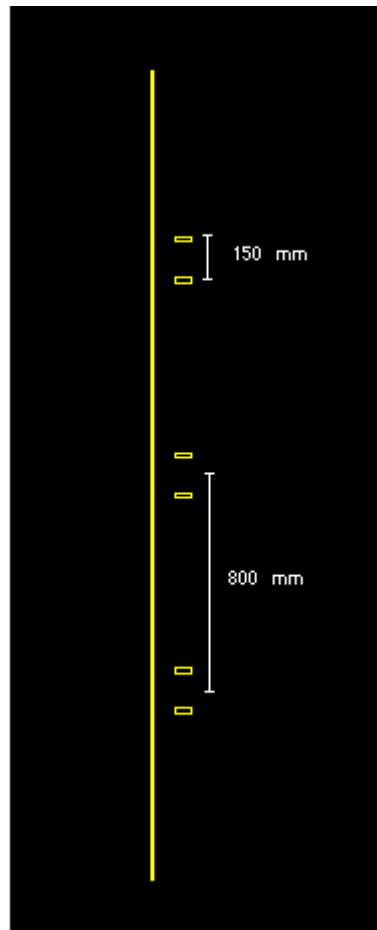
Kolmivaiheisessa järjestelmässä kiskojen synnyttämät virrat kumoavat osittain toisensa. Kuvasta 6 nähdään, että suurin häviökeskittymä syntyy kolmivaiheisessa järjestelmässä ensimmäisen vaihejohtimen kohdalle.



Kuva 6 ACE-ohjelmalla mallinnettu kuva kolmivaihekiskoston aiheuttamasta häviökeskittymästä. Kiskoston virta on 5 kA ja etäisyys levystä 40 mm.

5.1.3 Austeniittiteräslevyn lämpenemän mallintaminen

ACE-ohjelmaan piirrettiin mahdollisimman samankaltainen testijärjestely, kuin laboratoriossa. Mallintamisessa käytetty teräslevy oli 3000 mm korkea ja 2000 mm leveä pystysuora teräslevy. Virtakiskosto koostui kolmesta vaihekiskonipusta, jotka oli jaettu kahteen osaan. Osakiskojen välinen etäisyys oli 150 mm ja vaiheiden välinen etäisyys oli 800 mm. Ohjelmaan piirretty järjestely on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7 Tietokonemallinnuksessa käytetty kolmivaiheinen testijärjestely. Virtakiskojen ja levyn välinen etäisyys on 80 mm ja vaiheiden väli 800 mm.

Lämpenemää tutkittiin tietokonemallinnuksella ainoastaan suojaamattoman teräslevyn tapauksessa, koska suojamateriaalien ominaisuuksien mallintaminen ACE-ohjelmalla on vaikeaa. Suojaa mallintaessa ohjelmalle tulisi määrittää myös materiaalin sähkönjohtavuus, jota ei ACE-ohjelmalla voi määrittää.

Tietokonelaskelmista saatiin tuloksiksi suurimmat häviötehotiheydet, joista voitiin laskea suurimmat lämpenemät. Tulokset saatiin 10 kA syöttövirrasta 25 kA virtaan saakka. Virran taajuus oli 50 Hz sekä virtakiskoston ja levyn etäisyys 80 mm. Tuloksiksi saadut tehotiheysarvot muutettiin lämpenemäksi vertaamalla laboratoriossa mitattuja tuloksia tietokonemallinnuksella saatuihin tehotiheysarvoihin.

Taulukko 1 Virtakiskoston syöttövirtoja vastaavat tietokoneella lasketut tehotiheyden arvot ja laboratoriossa mitatut lämpenemän arvot.

I (kA)	P_v (MW/m³)	ΔT (°C)
9,0	0,686	167,5
7,0	0,448	120,0
4,9	0,217	74,7
3,0	0,093	29,1

Laboratoriossa mitattujen arvojen ja tietokoneella laskettujen arvojen perusteella voidaan muodostaa yhtälö 5-1, josta saadaan suojaamattoman levyn ja häviötiheyden välinen riippuvuus.

$$\Delta T = 248P_v^{0,876}, \quad (5-1)$$

jossa ΔT on levyn lämpenemä (°C) ja P_v tehotiheys (MW/m³).

6 LÄMPENEMISKOKEIDEN ANALYSOINTI

Muuntajan epämagneettisten metalliosien lämpenemistä suurvirtakiskoston läheisyydessä tutkittiin laboratoriokokeilla sekä tietokoneohjelman avulla. Lämpenemistä tutkittiin syöttövirran, taajuuden sekä johtimen ja levyn etäisyyden funktiona. Parametrit valittiin samalla lailla kuin vuonna 2006 tehdyissä kokeissa.

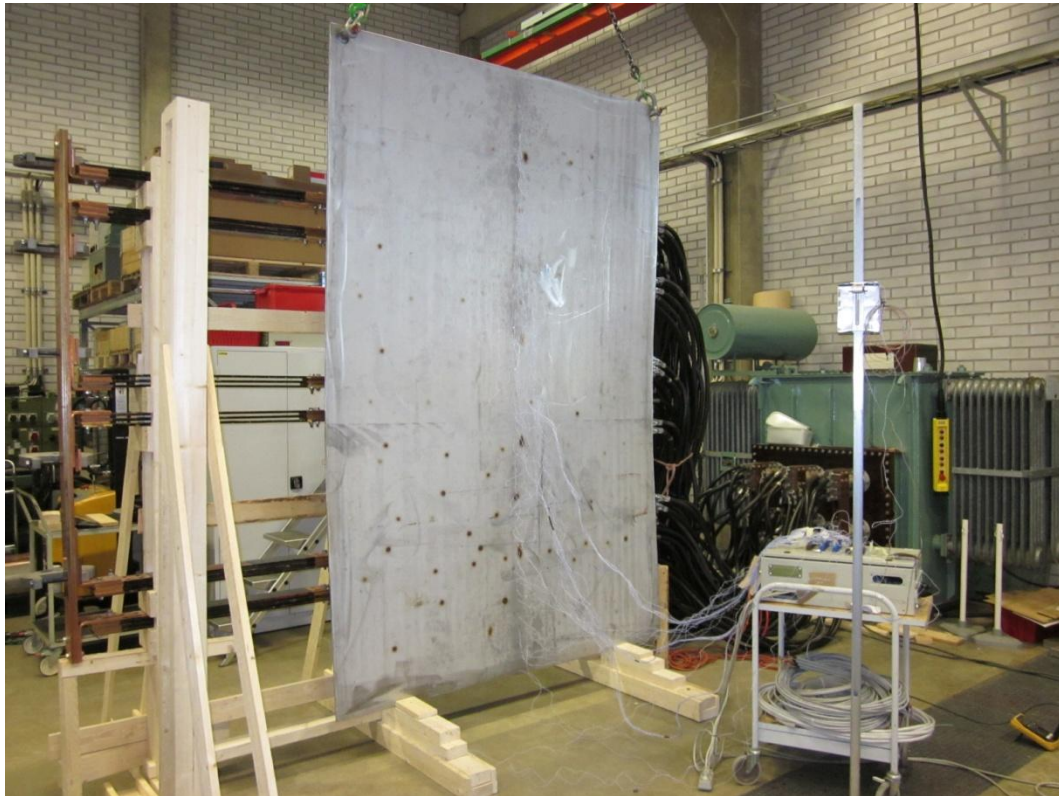
Vuonna 2006 tehdyissä kokeissa tutkittiin muuntajan rautaosien lämpenemistä virran, levyn ja kiskoston etäisyyden sekä virran taajuuden funktiona. Näitä riippuvuuksia tutkittiin sekä läpivientiaukon että seinämän lämpenemiselle.

Tässä työssä laajennettiin vuonna 2006 tehtyjä mittauksia tutkimalla epämagneettisten osien lämpenemistä suurvirtakiskoston läheisyydessä. Mittaukset tehtiin suojaamattomalle ja suojatulle epämagneettiselle terälevylle, sekä erilaisille puristuspalkeille. Kaikki laborioritellit perustuvat alle 10 kA testeihin.

Tässä luvussa analysoidaan mittausten tuloksia sekä niiden riippuvuuksia. Tarkat mittaustulokset on esitetty liitteessä 3 ja testikappaleiden lämpenemän laskemiseen tarvittava yhtälö on johdettu liitteessä 4.

Syöttökiskon epäsymmetrisen rakenteen vuoksi kuumin alue kiskostoissa löytyi kaikissa tapauksissa keskimmäisen vaihekiskon kohdalta. Reunimmaisten kiskojen impedanssin olivat suurempia kuin keskimmäisen, jolloin keskimmäisessä vaiheessa kulki muita vaiheita suurempi virta. Tällöin myös levyissä syntyvät häviöt olivat suurimpia keskimmäisen vaiheen kohdalta. Vaihevirtojen suuruusero oli sitä suurempaa, mitä suurempaa syöttövirtaa käytettiin. 9 kA virralla keskimmäisen vaiheen virta oli lähes 30% suurempi kuin muiden vaiheiden.

6.1 Suojaamaton epämagneettinen teräslevy kolmivaihekiskoston läheisyydessä



Kuva 8 Suojaamaton austeniittiteräslevy

Kokeessa tutkittiin 2000×3000 mm suojaamattoman austeniittiteräslevyn lämpenemistä kolmivaihekiskoston läheisyydessä. Mittaustulokset saatiin lämpötilantureilta, joita aseteltiin teräslevyn keskelle 41 kpl. tasavälein 75 mm välein.

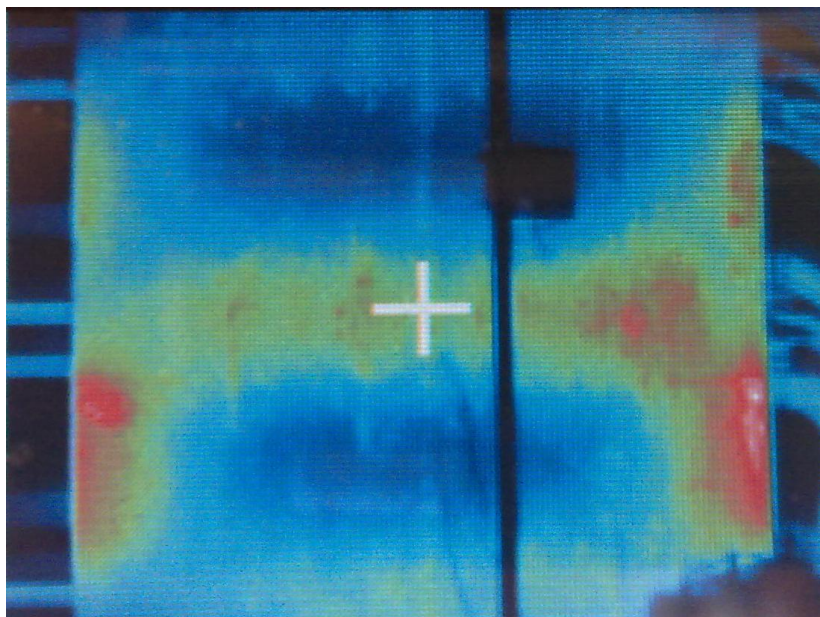
Vuonna 2006 tehdyissä kokeissa teräslevy taipui lämmitessä. Samanlaista taipumista esiintyi myös tämän työn testeissä suurimmilla virroilla ja taajuuksilla. Oikea etäisyys virtakiskostoon saatiin kuitenkin pysymään melko hyvin.

6.1.1 Virran vaikutus levyn lämpenemään

Virran vaikutusta lämpenemään tutkittiin pitämällä levyn ja kiskoston etäisyys 80 mm ja pitämällä taajuus 50 Hz. Virran vaikutusta tutkittiin neljällä eri virralla. Virtaa muutettiin yhdeksästä kiloampeerista kolmeen kiloampeeriin. Levyn lämmitys aloitettiin 9 kA virralla, josta sitä pudotettiin seuraavia kokeita varten mata-

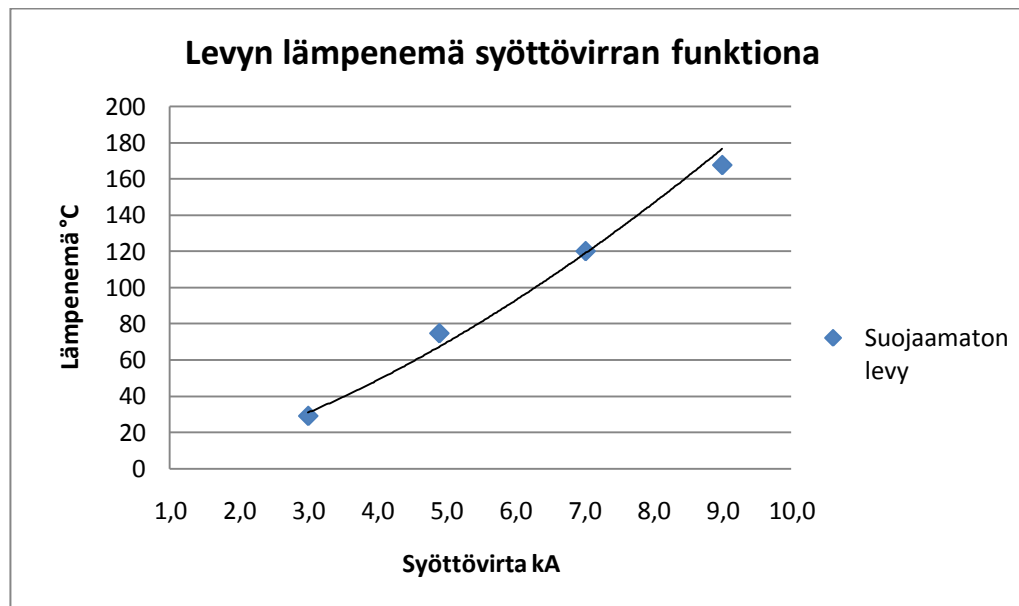
lammaksi. Levyn hot-spotin lämpötilan tasaantumiseen meni noin kolme tuntia, jonka jälkeen lämpötilat rekisteröitiin ja virtaa tiputettiin seuraavaan tasoon. Lämpötilan tasaantuminen uutta virtaa mitattaessa kesti noin kaksi tuntia.

Kuumimmat alueet levyssä kehittyivät keskimmäisen vaiheen kohdalle, mutta lämpökameralla otetuista kuvista kävi ilmi, että levyn reunat kuumenevat enemmän kuin levyn keskikohta, missä lämpöanturit sijaitsivat. Kuvasta 9 nähdään että toisen ja kolmannen vaiheen välille levyn reunoihin on muodostunut kuumia alueita. Levyn reunoihin ei sijoitettu lämpötila-antureita, mutta pintalämpömittarilla mitattaessa huomattiin että 9 kA mittauksessa reunat kuumenivat yli 200 °C, levyn keskellä suurimman lämpötilan ollessa noin 190 °C. Tarkat mittaustulokset on esitetty liitteessä 3.



Kuva 9 Lämpökameran kuva ensimmäisestä testilevystä 9 kA virralla. Levy kuumentui huomattavasti toisen ja kolmannen vaiheen välillä levyn reunoista.

Levyn lämpimimmät kohdat olivat kaikilla virran arvoilla toisen ja kolmannen vaiheen välillä levyn reunoissa. Kuvasta 10 nähdään suojaamattoman austeniittiteräslevyn lämpenemän eri virroilla.

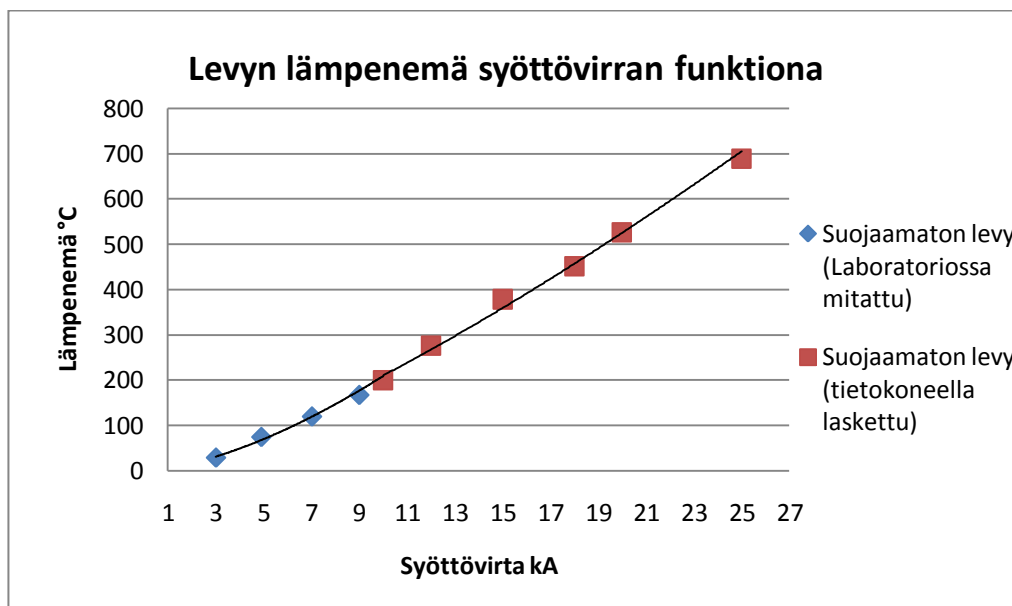


Kuva 10 Suojaamattoman epämagneettisen teräslevyn lämpenemä syöttövirran funktiona. Virtakiskoston ja levyn välinen etäisyys on 80 mm ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

Suojaamattoman epämagneettisen teräslevyn lämpenemän kuvaajalle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-1. Yhtälöstä nähdään suojaamattoman teräslevyn lämpenemä kuormitusvirran funktiona. Yhtälö on johdettu liitteessä 5.

$$\Delta T(I) = 8,923 \cdot 10^{-5} \text{°C} \left(\frac{I}{a} \right)^{1,593}, \quad (6-1)$$

jossa a on I A.



Kuva 11 Suojaamattoman austeniittiteräslevyn lämpenemä syöttövirran funktiona. Virtakiskoston ja levyn etäisyys on 80 mm ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

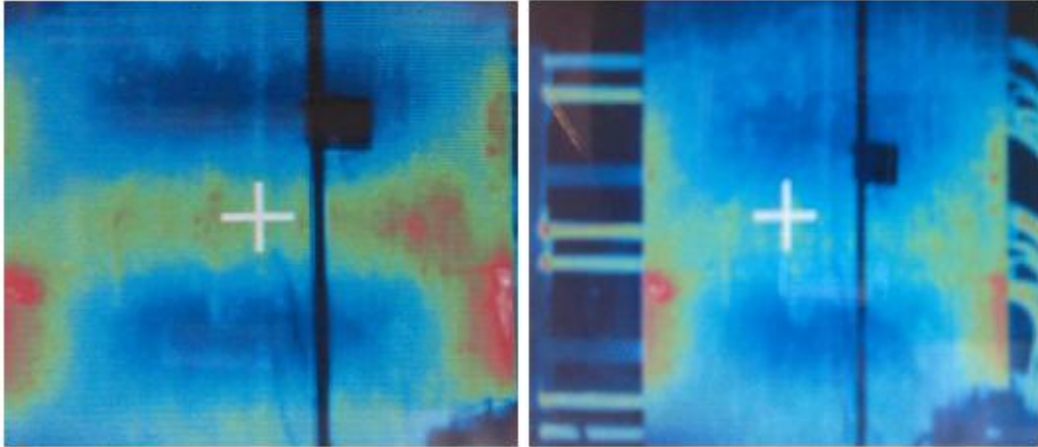
Kuvasta 11 nähdään suojaamattoman teräslevyn lämpenemän lisäksi tietokoneella lasketut lämpenemän arvot. Tulokset osuvat melko hyvin samalle käyrälle ja lämpenemän kasvunopeus syöttövirran kasvaessa pysyy lähes samana.

6.1.2 Johtimen ja levyn välisen etäisyyden vaikutus levyn lämpenemään

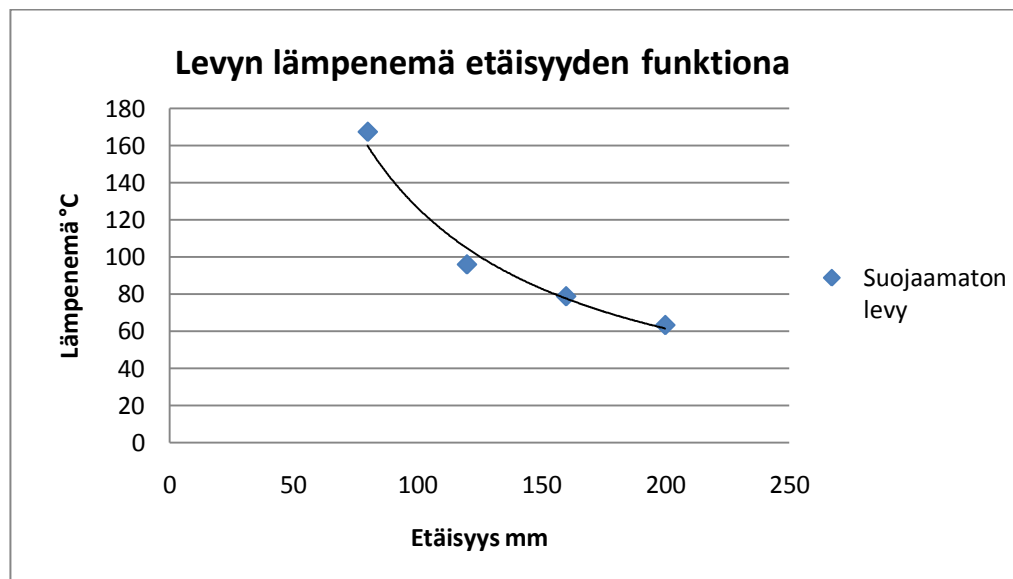
Etäisyyden vaikutusta lämpenemään tutkittiin pitämällä virta 7 kA ja taajuus 50 Hz. Etäisyyden vaikutusta levyn lämpenemään tutkittiin neljällä eri etäisyydellä. Levyn ja kiskoston välistä etäisyyttä muutettiin 80 mm ja 200 mm välillä. 80 mm etäisyys mitattiin 7 kA virralla jo edellisessä kohdassa, joten siinä voitiin käyttää samaa tulosta.

Suuremmilla etäisyyksillä virtakiskoja ympäröivät magneettikentät jakautuivat pieniä etäisyyksiä tasaisemmin levyn pinnalle, jolloin myös levyn häviöteho jakautui tasaisemmin. Kuvassa 12 on lämpökameran kuva pienimmän ja suurimman etäisyyden välisestä erosta. Suurimmalla etäisyydellä häviöteho on jakautunut tasaisemmin levyn pinnalle ja lämpötilat pysyvät alle 100 °C. Kuumimmat kohdat sijaitsevat edelleen toisen ja kolmannen vaiheen välissä levyn reunoilla. Pintaläm-

pömittarilla mitattuna levyn reunat olivat 80 mm etäisyydellä noin 170 °C ja 200 mm etäisyydellä noin 110 °C.



Kuva 12 Vertailu 80 mm ja 200 mm mittauksista. Vasemmalla 80 mm koe ja oikealla 200 mm koe. Kummassakin mittauksessa virta oli 7 kA.



Kuva 13 Suojaamattoman epämagneettisen teräslevyn lämpenemä virtakiskoston ja levyn etäisyyden funktiona. Virta 7 kA ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

Suojaamattoman epämagneettisen teräslevyn lämpenemälle kiskoston ja johtimen välisen etäisyyden funktiona saadaan yhtälö 6-2.

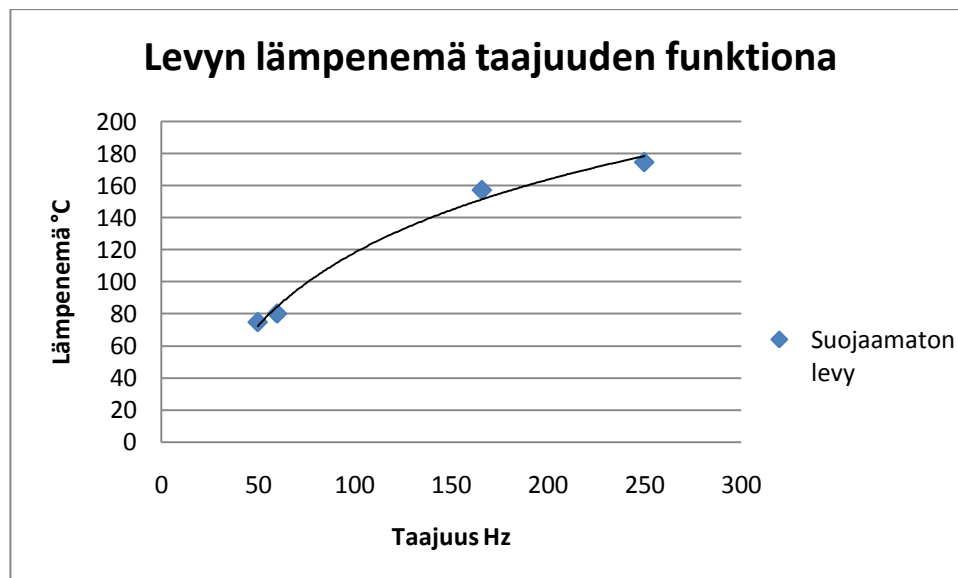
$$\Delta T(r) = 11,10^{\circ}\text{C} \left(\frac{r}{b}\right)^{-1,06}, \quad (6-2)$$

jossa b on 1 m .

6.1.3 Taajuuden vaikutus levyn lämpenemään

Taajuuden vaikutusta levyn lämpenemään tutkittiin neljällä kokeella. Etäisyys virtakiskostoon pidettiin 80 mm ja virta 5 kA. Taajuutta muutettiin 50 Hz ja 250 Hz välillä. 250 Hz taajuus on sama kuin viidennen harmonisen virran yliaaltokomponentin taajuus. Sitä suurempien harmonisten yliaaltokomponenttien tehot ovat niin pieniä, ettei niillä ole enää suurta merkitystä lämpenemän kannalta.

Suurilla taajuuksilla alkeisvaraukset liikkuvat nopeammin ja häviöt ovat suurempia. Yliaallot ovat siis merkittävä tekijä häviöiden suuruuteen ja metalliosien lämpenemiseen.



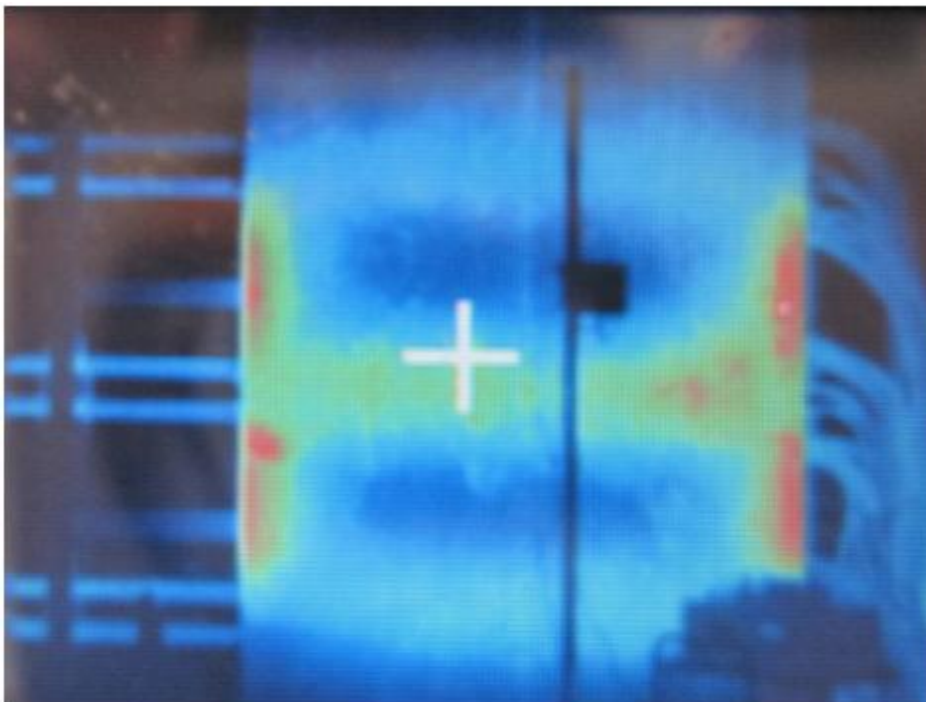
Kuva 14 Suojaamattoman epämagneettisen teräslevyn lämpenemä taajuuden funktiona. Virta 5 kA sekä kiskoston ja levyn välinen etäisyys 80 mm.

Syöttövirran taajuus on merkittävä tekijä seinämän lämpenemään. Suuremmilla 166 Hz ja 250 Hz taajuuksilla levy lämpeni huomattavan nopeasti yli 150 °C. Kuvasta 14 nähdään levyn lämpenemä taajuuden funktiona ja kuvasta 15 lämpöka-

meralla otettu kuva, kun taajuutena oli 250 Hz. Myös tässä testissä suurimmat lämpötilat mitattiin toisen ja kolmannen vaihekiskon välistä levyn reunoista. Suurimman lämpötilan levyn keskellä ollessa noin 200 °C, olivat levyn reunat jo noin 300 °C. Kuvan 14 kuvaajalle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-3.

$$\Delta T(f) = 9,72^{\circ}\text{C}(cf)^{0,527}, \quad (6-3)$$

jossa c on l s.



Kuva 15 Lämpökameralla otettu kuva levyn lämpenemisestä kun syöttövirran taajuus oli 250 Hz.

Kuvasta nähdään, että levyn reunat kuumenevat laajemmin ja levyyn kehittyvät lämpökeskittymät näkyvät selvemmin.

6.2 Suojattu epämagneettinen teräslevy kolmivaihekiskoston läheisyydessä

Kokeessa tutkittiin suojatun 2000 × 3000 mm suojatun austeniittiteräslevyn lämpenemistä kolmivaihekiskoston läheisyydessä. Teräslevyn suojana käytettiin kuparilevyä, joka oli hitsattu levyyn kiinni. Kuparilevy hitsattiin levyyn siten, että se jäi 300 mm lyhyemmäksi teräslevyn reunasta, jolloin mittaustulokset saatiin myös

suojan reunalta. Teräslevyyn hitsattu kuparisuoja toimii pyörrevirtasuojana. Kuparin hyvä sähkönjohtavuus sekä epämagneettisuus vähentää pyörrevirtahäviöitä. Suojalevyn tulisi olla tarpeeksi suuri, jotta peilivirta ja paluuvirta pääsevät vapaasti kiertämään levyn pinnalla. Kuparisuojan ansiosta levy ei taipunut samalla tavalla kuin suojaamaton levy, mutta levyn suojaamaton reuna taipui melko paljon suuremmilla lämpenemillä.



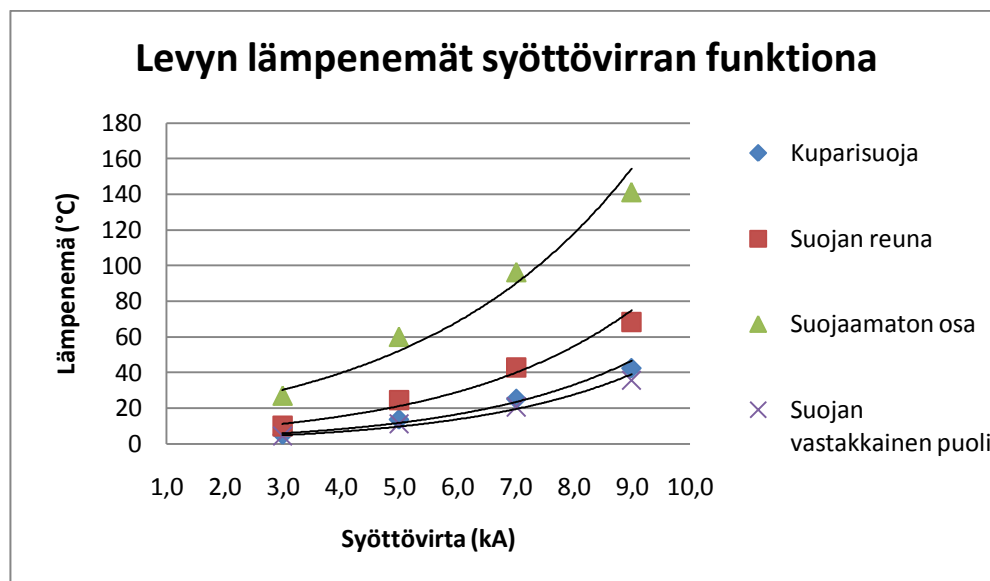
Kuva 16 Kuparilla suojattu austeniittiteräslevy. Suojaus jätettiin 300 mm reunasta vajaaksi, jotta pystyttäisiin tutkimaan myös suojan reunan ja levyn reunan lämpenemää.

Kokeessa käytettiin yhteensä 60 kpl. lämpötila-antureita. Kuparisuojaan antureita sijoitettiin 15 kpl. suojan keskelle, 15 kpl. suojan reunalle 20 mm päähän reunasta, 15 kpl. suojaamattomaan osaan teräslevyä 150 mm levyn reunasta sekä 15 kpl. suojan vastakkaiselle puolelle teräslevyyn.

6.2.1 Virran vaikutus levyn lämpenemään

Virran vaikutusta suojatun levyn lämpenemään tutkittiin neljällä eri virralla. Virtaa muutettiin kolmesta kiloampeerista yhdeksään kiloampeeriin. Levyn ja vaihekiskoston etäisyytenä pidettiin 80 mm ja taajuutta 50 Hz.

Kuparisuoja toimi hyvin pyörrevirtasuojana. Kuparisuojassa sekä sen vastakkaisella puolella lämpenemät olivat samankaltaiset pysyen alle 50 °C.



Kuva 17 Suojatun epämagneettisen teräslevyn lämpenemät syöttövirran funktiona. Kiskoston ja levyn etäisyys 80 mm ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

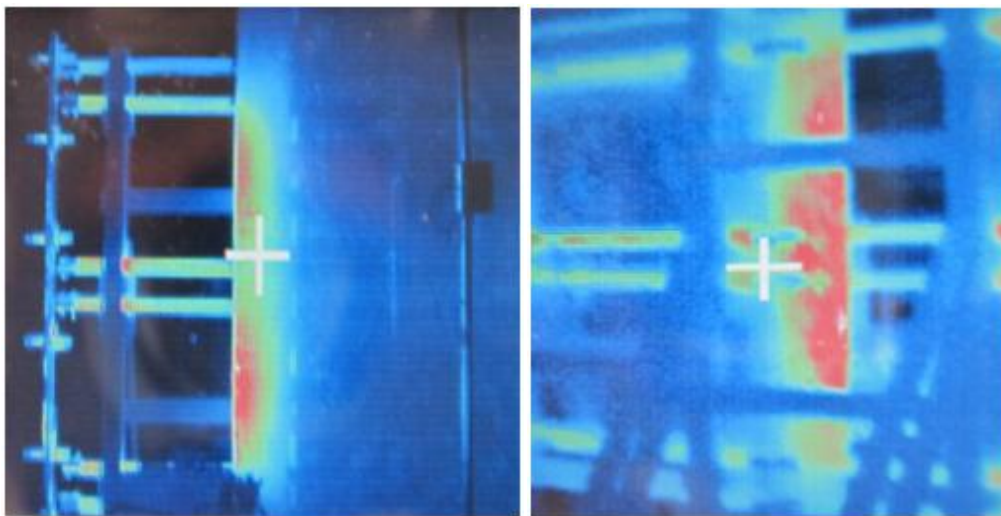
Kuvasta 17 nähdään, että kuparisuojan kasvunopeus on hieman hitaampaa verrattuna suojaamattomaan osaan ja suojatun osan lämpenemä on muutenkin heikompaa. Mittaustuloksista saadaan johdettua yhtälöt kuparisuojan, suojan reunan ja suojaamattoman osan lämpenemälle.

Kuparisuojan lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-4 ja suojan reunalle yhtälö 6-5. Suojaamattoman levyn osan lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-6.

$$\Delta T_{Cu}(I) = 4,21 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \left(\frac{I}{a}\right)^{1,91} \quad (6-4)$$

$$\Delta T_{Cu/Aust}(I) = 8,89 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} \left(\frac{I}{a}\right)^{1,75} \quad (6-5)$$

$$\Delta T_{Aust}(I) = 1,52 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \left(\frac{I}{a}\right)^{1,51} \quad (6-6)$$

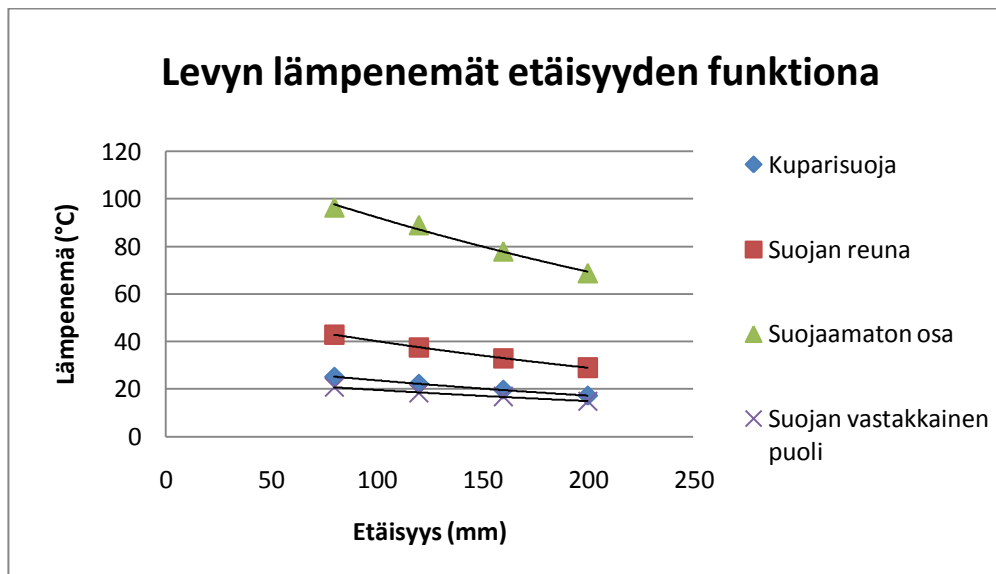


Kuva 18 Lämpökameran kuva levystä 9 kA syöttövirralla kummaltakin puolelta.

Kuvasta 18 nähdään, että kuumin alue rajoittuu täysin suojaamattomaan kohtaan levyssä. Suojaamattoman kohdan lämpötila oli 9 kA virralla noin 170 °C, kun kuparisuojan lämpötila oli noin 80 °C.

6.2.2 Johtimen ja levyn välisen etäisyyden vaikutus levyn lämpenemään

Etäisyyden vaikutusta lämpenemään tutkittiin pitämällä virta noin 7 kA ja taajuus 50 Hz. Mittaukset tehtiin neljällä eri etäisyydellä. Etäisyyttä muutettiin välillä 80 mm – 200 mm.



Kuva 19 Suojatun epämagneettisen teräslevyn lämpenemät virtakiskoston ja levyn etäisyyden funktiona. Syöttövirta 7 kA ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

Kuvasta 19 nähdään etäisyyden vaikutus suojatun levyn lämpenemään. Kuparisuojan reunalla kiskoston ja levyn välinen etäisyys vaikuttaa lämpenemään hieman enemmän kuin kuparisuojan keskellä. Reunan lämpenemän laskunopeus on kuitenkin lähes sama kuin suojaamattomassa levyn osassa. Suojan vastakkaisen puolen lämpenemä on etäisyydenkin vaihdellessa lähes suojan lämpenemään. Kuparisuojan ja suojan reunan lämpenemät lähenevät hieman toisiaan suuremmilla etäisyyksillä. Kun vertaa kohdan 6.1.2 kuvaa 13 ja kuvaa 19, nähdään että kuparilla suojatun levyn tapauksessa etäisyyden vaikutus levyn lämpenemään on vähäisempää kuin kokonaan suojaamattomalla levyllä.

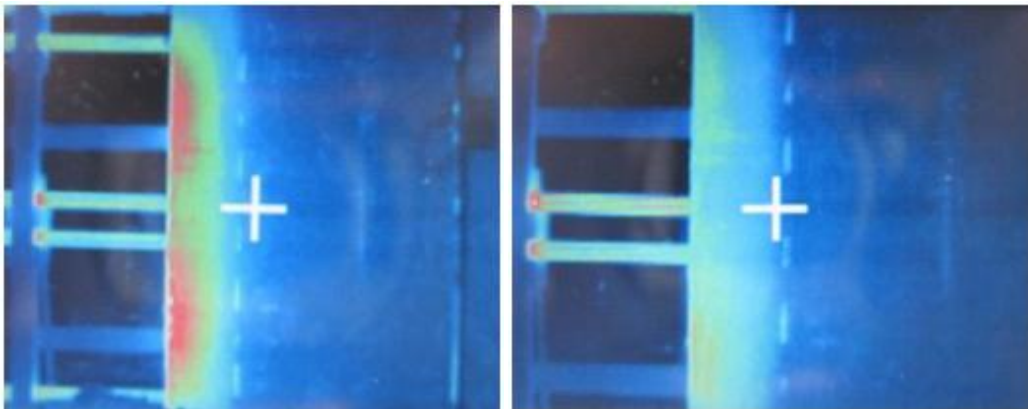
Kuparisuojan lämpenemälle etäisyyden muuttuessa voidaan kirjoittaa yhtälö 6-7 ja suojan reunalle yhtälö 6-8. Suojaamattoman levyn osan lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-9.

$$\Delta T_{Cu}(r) = 8,98^{\circ}\text{C} \left(\frac{r}{b}\right)^{-0,417} \quad (6-7)$$

$$\Delta T_{Cu/Aust}(r) = 14,87^{\circ}\text{C} \left(\frac{r}{b}\right)^{-0,427} \quad (6-8)$$

$$\Delta T_{Aust}(r) = 39,20^{\circ}\text{C} \left(\frac{r}{b}\right)^{-0,367} \quad (6-9)$$

Suuremmilla etäisyyksillä magneettikentät jakautuivat tasaisemmin levyn pinnalle, jolloin myös häviöteho jakautuu tasaisemmin. Kuvasta 20 nähdään, että suuremmalla etäisyydellä lämpökeskittymät ovat jakautuneet tasaisemmin levyn suojaamattomalle osalle ja lämpenevät huomattavasti vähemmän. Suojan kohdalta levy ei lämpene merkittävästi.

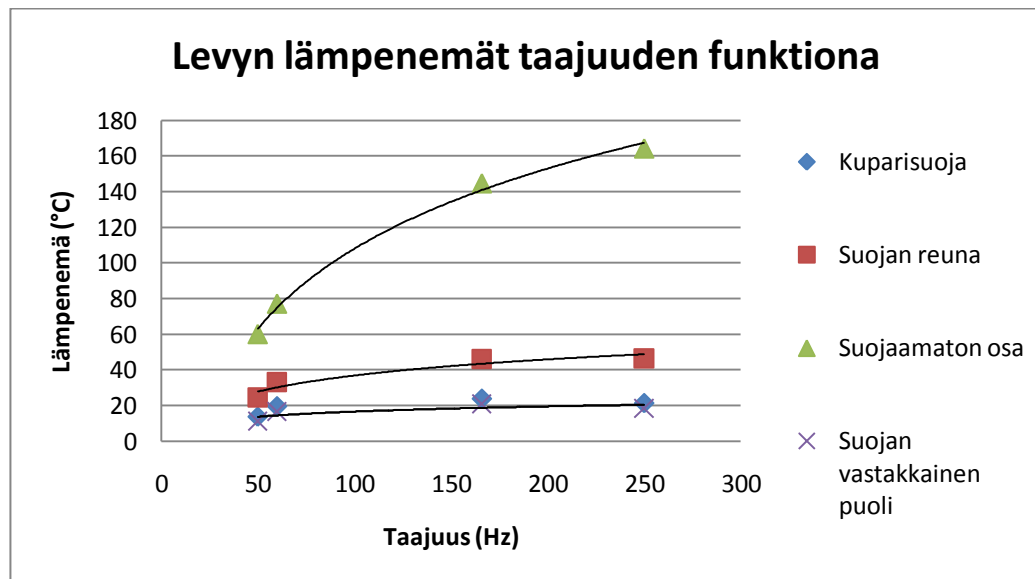


Kuva 20 Lämpökamerakuva suojatusta levystä kun levyn ja virtakiskoston etäisyyttä on muutetaan. Vasemalla levyn ja kiskoston etäisyys 80 mm ja oikealla etäisyys 200 mm.

6.2.3 Taajuuden vaikutus levyn lämpenemään

Taajuuden vaikutusta levyn lämpenemään tutkittiin pitämällä virta noin 5 kA sekä levyn ja kiskoston etäisyytenä 80 mm.

Suojaamattomassa osassa virran yliaaltokomponentit nostavat nopeasti levyn lämpenemää taajuuden kasvaessa, mutta kuparisuojan keskellä tai sen vastakkaisella puolella levy ei juurikaan lämpene suurillakaan taajuuksilla. Kuparisuojan reunan lämpenemä on kuitenkin noin puolet suurempi 250 Hz taajuudella kuin 50 Hz taajuudella.



Kuva 21 Suojatun epämagneettisen teräslevyn lämpenemät syöttövirran taajuuden funktiona. Virtakiskoston ja levyn etäisyys 80 mm ja syöttövirta 5 kA.

Kuvasta 21 nähdään levyn lämpenemät taajuuden funktiona. Levyn kuparisuojan ja suojan vastakkaisen puolen lämpenemät ovat lähes identtiset, josta voidaan todeta ettei levy pääse lämpenemään ollenkaan suojan läpi. Suojaamattoman osan lämpenemät eroavat vasta suuremmilla taajuuksilla suojan lämpenemästä.

Kuvasta 21 ja liitteessä 5 olevasta lämpötilanjakaumasta nähdään, että suuremmilla taajuuksilla ei ole enää merkittävää vaikutusta kuparisuojan tai suojan reunan lämpenemään. Mittaustuloksista saadaan johdettua yhtälöt levyn lämpenemälle taajuuden funktiona.

Kuparisuojan lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-10 ja suojan reunan lämpenemälle yhtälö 6-11. Levyn suojaamattoman osan lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-12.

$$\Delta T_{Cu}(f) = 5,34^{\circ}C (cf)^{0,277} \quad (6-10)$$

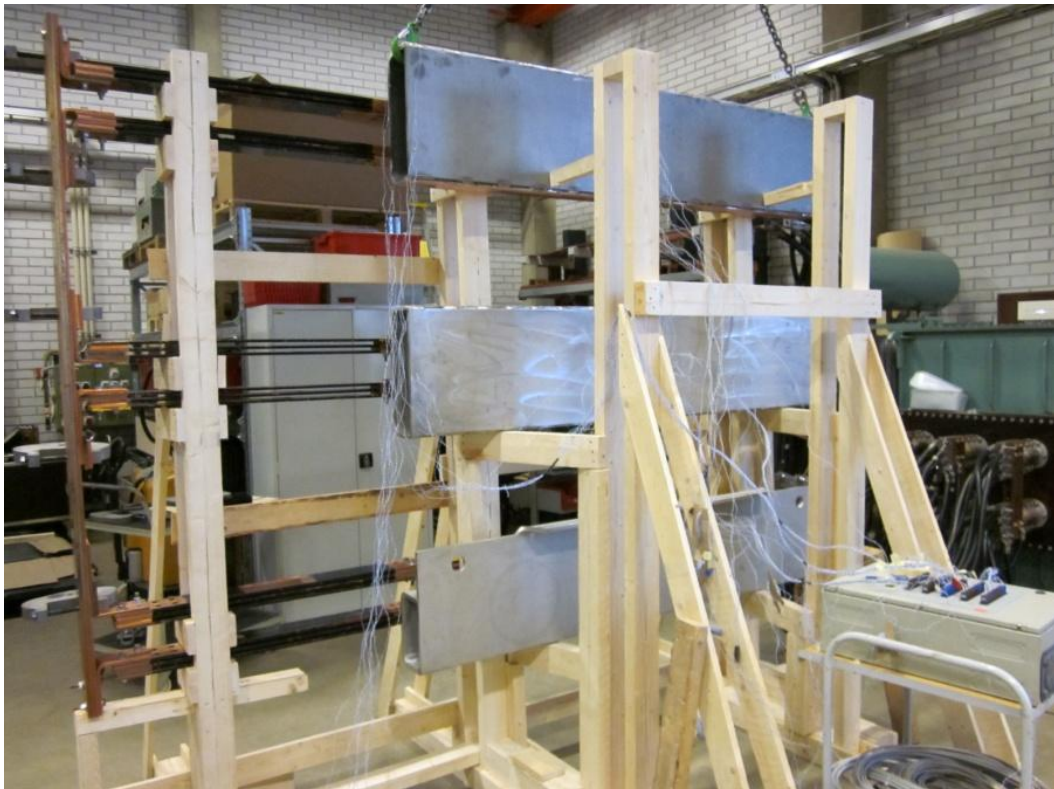
$$\Delta T_{Cu/Aust}(f) = 5,69^{\circ}C (cf)^{0,399} \quad (6-11)$$

$$\Delta T_{Aust}(f) = 5,55^{\circ}C (cf)^{0,626} \quad (6-12)$$

6.3 Puristuspalkit kolmivaihekiskostoon nähden samansuuntaisesti

Puristuspalkkien mittaukset suoritettiin kahdessa osassa. Tässä kappaleessa tutkitaan testikappaleiden lämpenemistä virran, etäisyyden ja taajuuden funktiona testikappaleen ollessa asetettuna kolmivaihekiskostoon nähden samansuuntaisesti. Testikappaleina käytettiin kolmea eri puristuspalkkia. Ensimmäisenä kappaleena käytettiin magneettisesta teräksestä tehtyä palkkia, joka oli suojattu 4 mm kuparilla, toisena kappaleena käytettiin ruostumattomasta austeniittiteräksestä tehtyä puristuspalkkia ja kolmantena kappaleena austeniittiteräksestä tehtyä LDT-puristuspalkkia. Kahden ensimmäisen kappaleen mitat olivat 425×2000 mm ja LDT-palkin 442×2000 mm.

Palkit pyrittiin asettelemaan siten, että vaihekiskojen päät näkyvät palkkien takaa ja että pystysuoran neutraalin kiskon vaikutus lämpenemiseen olisi mahdollisimman vähäinen.



Kuva 22 Puristuspalkit vaihekiskojen kanssa samansuuntaisesti. Ylimpänä kuparilla suojattu magneettinen palkki, keskellä suojaamaton epämagneettinen palkki ja alimpana LDT-puristuspalkki.

Syöttövirran epätasainen jakautuminen vaihekiskoihin vaikeutti hieman mittauksia puristuspalkkien sijoittelun vuoksi. Jokainen palkki sijoitettiin oman vaihekiskonipun kohdalle, jolloin jokaisen palkin kohdalla kulki erisuuruinen virta.

Lämpötila-anturit aseteltiin palkkien keskustan ja reunan ympärille siten, että palkin mittauskohdan ympäri kiersi 13 anturia. Tällöin anturien kokonaismääräksi tuli 78 kpl. Liitteessä 2 on kuvattu palkkien sijoittelu virtakiskostoon nähden sekä lämpötila-antureiden sijainnit.

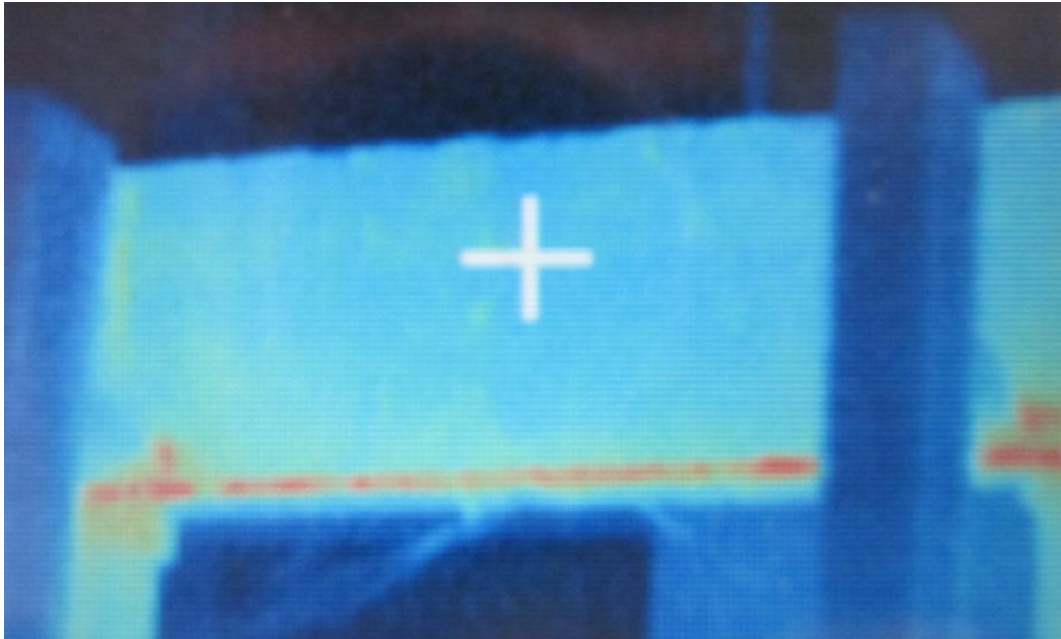


Kuva 23 Kuvassa puristuspalkit vaihekiskojen puolelta kuvattuna.

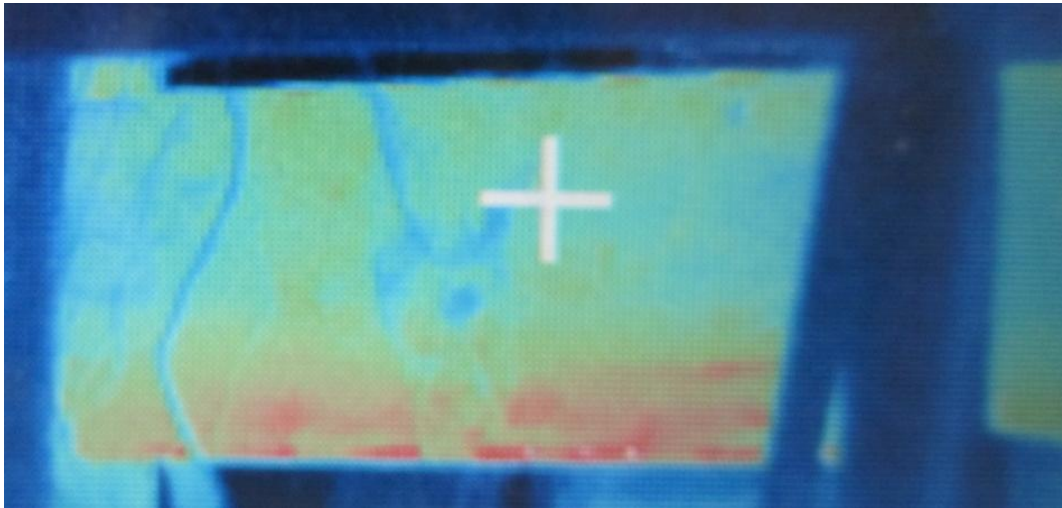
6.3.1 Virran vaikutus palkkien lämpenemään

Virran vaikutusta lämpenemään tutkittiin pitämällä puristuspalkkien ja kiskoston välinen etäisyys 80 mm ja pitämällä taajuus 50 Hz. Virran vaikutusta tutkittiin neljällä eri virralla. Virtaa muutettiin välillä 3 kA – 9 kA.

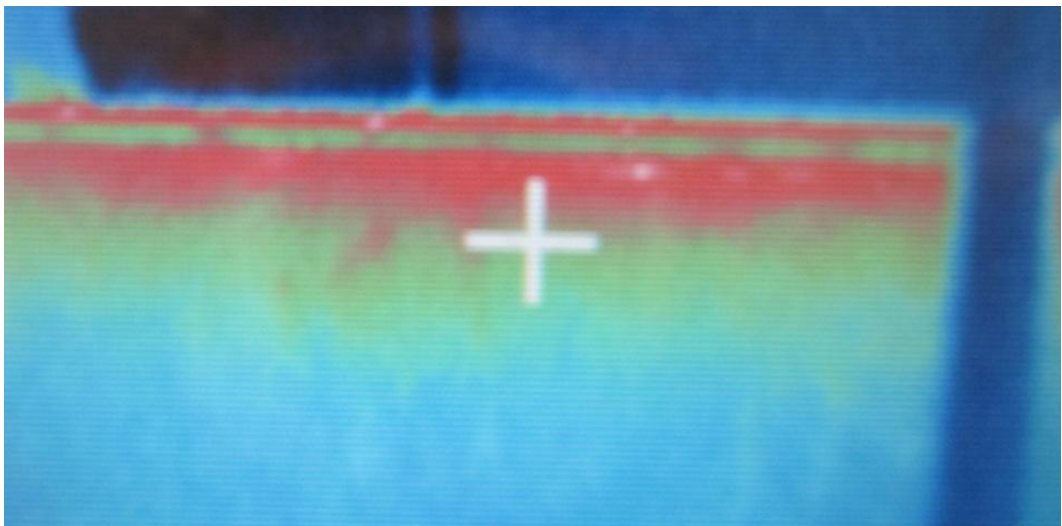
Pienemmillä syöttövirroilla puristuspalkkien lämpenemä oli lähes olematon. LDT-puristuspalkin kuumimmat kohdat syntyivät taivutettuun reunaan palkin keski-
osassa. Suojaamattomalla puristuspalkilla kuumimmat kohdat syntyivät lähinnä
virtakiskosta olevaan pintaan. Suojatun puristuspalkin kuumimmat kohdat syn-
tyivät kuparisuojan ja magneettisen metallin saumaan palkin alaosaan. Kupa-
risuojan kohdalla lämpenemä pysyi suhteellisen matalana.



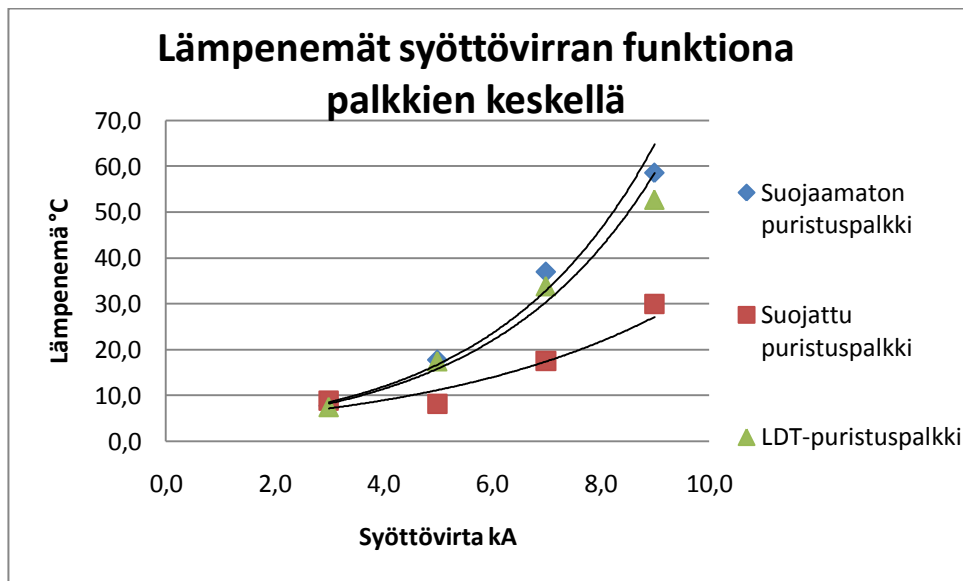
Kuva 24 Lämpökameralla otettu kuva kuparilla suojatun puristuspalkin kuumimmasta kohdasta. Suurin lämpötila syntyi palkin kulmaan suojan reunalle.



Kuva 25 Lämpökameralla otettu kuva suojaamattomasta puristuspalkista. Lämpimimmät kohdat syntyivät virtakiskosta lähimpänä olevaan tasoon, sekä palkin alareunaan.



Kuva 26 Lämpökameralla otettu kuva LDT-puristuspalkista. Lämpimimmät kohdat syntyivät palkin yläosaan reunan taivutettuun osaan. Myös palkin muut taivutetut reunat lämpenivät huomattavasti.



Kuva 27 Puristuspalkkien lämpenemät syöttövirran funktiona palkkien keskikohdasta mitattuna. Palkkien ja virtakiskoston etäisyys 80 mm ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

Kuvasta 27 nähdään, että pienemmillä syöttövirroilla palkkien lämpenemät vastaavat lähes täysin toisiaan. Eroja syntyy vasta suurimmilla syöttövirran arvoilla, kun suojatun palkin lämpenemä sekä lämpenemän kasvunopeus jäävät heikommiksi muihin palkkeihin verrattuna.

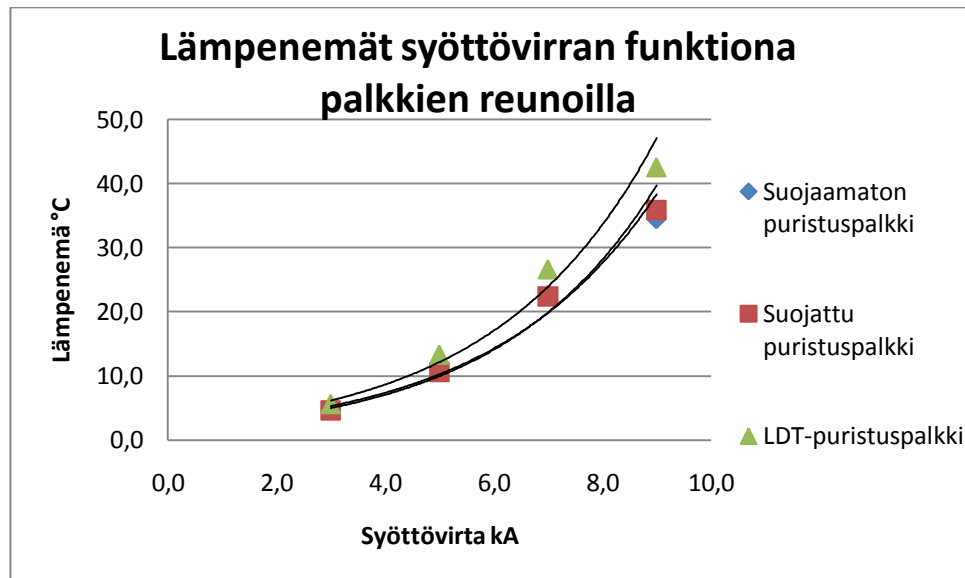
Mittaustuloksista saadaan johdettua yhtälöt palkkien keskiosan lämpenemälle syöttövirran funktiona. Suojaamattoman puristuspalkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-13 ja kuparilla suojatun puristuspalkin lämpenemälle yhtälö 6-14. LDT-puristuspalkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-15.

$$\Delta T_{Aust}(I) = 3,14 \cdot 10^{-6} \text{°C} \left(\frac{I}{a}\right)^{1,836} \quad (6-13)$$

$$\Delta T_{Cu}(I) = 9,54 \cdot 10^{-4} \text{°C} \left(\frac{I}{a}\right)^{1,116} \quad (6-14)$$

$$\Delta T_{LDT}(I) = 4,47 \cdot 10^{-6} \text{°C} \left(\frac{I}{a}\right)^{1,787} \quad (6-15)$$

Yhtälöt on johdettu palkkien suurimpien lämpenemäkohtien mukaan. Palkkien lämpötilat jakautuivat kuitenkin todella epätasaisesti, jolloin esimerkiksi kuparilla suojatun palkin lämpenemän yhtälö on kuparisuojan ja magneettisen metallin hitaussaumasta.



Kuva 28 Puristuspalkkien lämpenemät syöttövirran funktiona palkkien reunoilta mitattuna. Palkkien ja virtakiskoston etäisyys 80 mm ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

Kuvasta 28 nähdään puristuspalkkien lämpenemät palkkien reunasta mitattuna. Lämpötila-anturit sijaitsivat 20 mm palkkien reunasta. Kun kuvaajaa verrataan palkkien keskiosasta mitattuihin tuloksiin, nähdään että lämpenemät ovat huomattavasti lähempänä toisiaan. Pienillä syöttövirroilla palkkien reunojen lämpenemillä ei ole juurikaan eroa.

Tuloksista voidaan johtaa yhtälöt palkkien reunojen lämpenemälle syöttövirran funktiona. Yhtälö 6-16 on suojaamattomalle puristuspalkille, yhtälö 6-17 on suojatulle puristuspalkille ja yhtälö 6-18 on LDT-puristuspalkille.

$$\Delta T_{Aust}(I) = 3,18 \cdot 10^{-6} \text{C} \left(\frac{I}{a}\right)^{1,777} \quad (6-16)$$

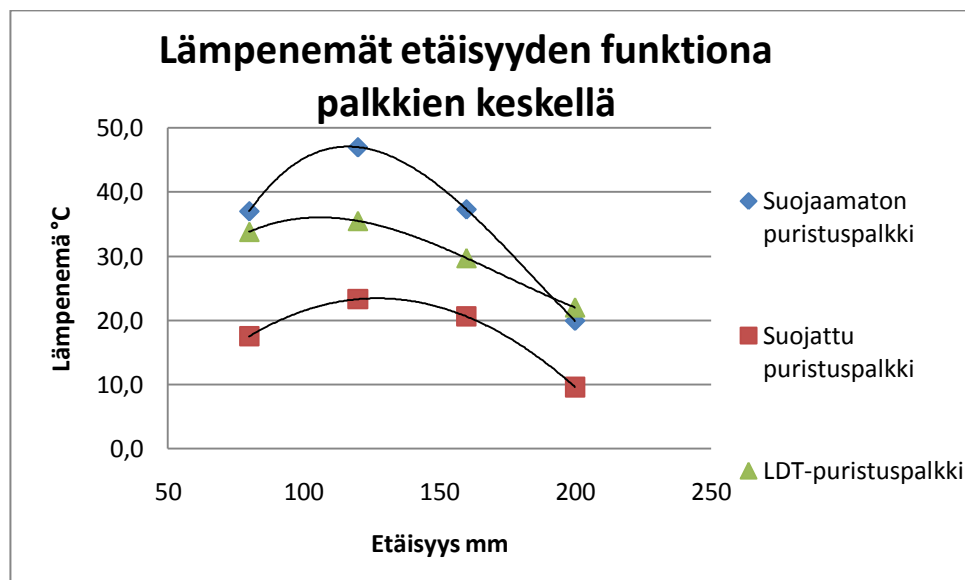
$$\Delta T_{Cu}(I) = 1,41 \cdot 10^{-6} \text{C} \left(\frac{I}{a}\right)^{1,870} \quad (6-17)$$

$$\Delta T_{LDT}(I) = 2,11 \cdot 10^{-6} \text{C} \left(\frac{I}{a}\right)^{1,845} \quad (6-18)$$

Kun verrataan lämpenemäyhtälöitä palkkien keskeltä ja reunasta, huomataan että suojatun puristuspalkin lämpenemän kasvunopeus on suurempi palkin reunalla kuin keskellä. Suojaamattomassa palkissa sekä LDT-palkissa ei ole huomattavia eroja lämpenemän kasvunopeuden suhteen.

6.3.2 Johtimien ja puristuspalkkien välisen etäisyyden vaikutus palkkien lämpenemään

Etäisyyden vaikutusta lämpenemään tutkittiin neljällä kokeella. Syöttövirta pidettiin 7 kA ja syöttövirran taajuus 50 Hz. Etäisyyttä muutettiin välillä 80 mm – 200 mm. Palkkien lämpimimmät kohdat pysyivät ennallaan etäisyyttäkin tutkittaessa.



Kuva 29 Puristuspalkkien lämpenemät virtakiskoston ja palkkien etäisyyden funktiona palkkien keskeltä mitattuna. Syöttövirta 7 kA ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

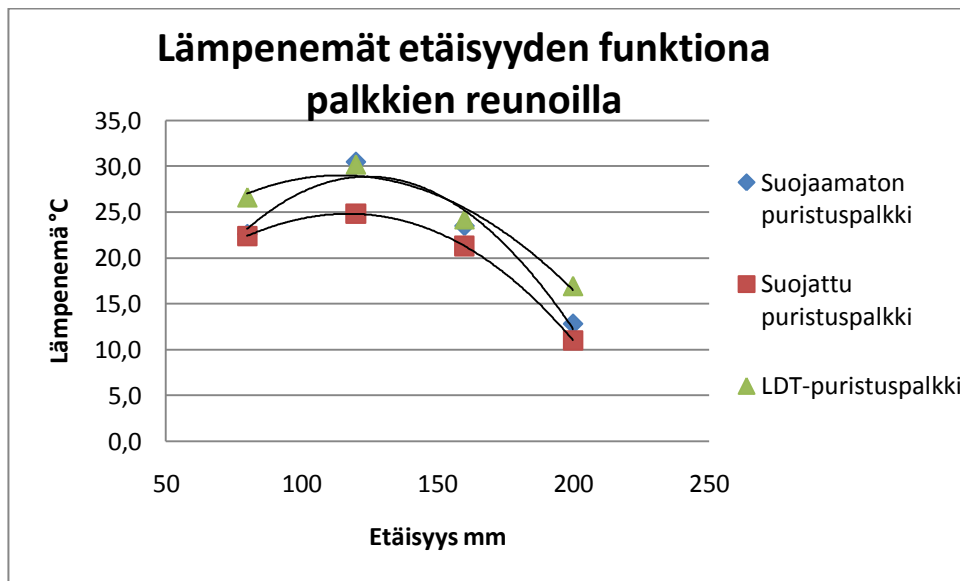
Kuvasta 29 nähdään puristuspalkkien lämpenemät virtakiskoston ja palkkien etäisyyden funktiona keskikohdasta mitattuna. Mittaustulosten mukaan 120 mm etäisyydeltä mitattu lämpenemä olisi suurempi kuin 80 mm etäisyydeltä mitattu lämpenemä, joten 80 mm tapauksessa mittaukset on todennäköisesti otettu ennen kuin palkkien hot-spot on tasaantunut lopulliseen lämpötilaan. LDT-puristuspalkin lämpenemän laskunopeus on hieman hitaampaa kuin muilla testikappaleilla. Suojatun palkin lämpenemä on huomattavasti heikompi kuin muilla palkeilla.

Mittaustuloksista saadaan johdettua yhtälöt lämpenemälle virtakiskoston ja palkkien etäisyyden funktiona palkkien keskeltä mitattuna. Suojaamattoman puristuspalkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-19 ja kuparilla suojatun puristuspalkin lämpenemälle yhtälö 6-20. LDT-puristuspalkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-21.

$$\Delta T_{Aust}(r) = 8,82^{\circ}\text{C} \left(\frac{r}{b}\right)^{-0,677} \quad (6-19)$$

$$\Delta T_{Cu}(r) = 4,68^{\circ}\text{C} \left(\frac{r}{b}\right)^{-0,655} \quad (6-20)$$

$$\Delta T_{LDT}(r) = 11,60^{\circ}\text{C} \left(\frac{r}{b}\right)^{-0,469} \quad (6-21)$$



Kuva 30 Puristuspalkkien lämpenemät virtakiskoston ja palkkien etäisyyden funktiona palkkien reunoilta mitattuna. Syöttövirta 7 kA ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

Kuvasta 30 nähdään, että palkkien lämpenemien kuvaajat ovat lähempänä toisiaan kuin palkkien keskikohdan lämpenemien kuvaajat. Palkkien lämpenemät ovat myös huomattavasti heikommät reunoilta mitattaessa kuin keskeltä mitattaessa.

Mittaustuloksista saadaan johdettua yhtälöt lämpenemälle virtakiskoston ja palkkien etäisyyden funktiona palkkien reunoilta mitattuna. Suojaamattoman puristus-palkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-22 ja kuparilla suojatun puristus-palkin lämpenemälle yhtälö 6-23. LDT-puristus-palkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-24.

$$\Delta T_{Aust}(r) = 6,29^{\circ}\text{C} \left(\frac{r}{b}\right)^{-0,620} \quad (6-22)$$

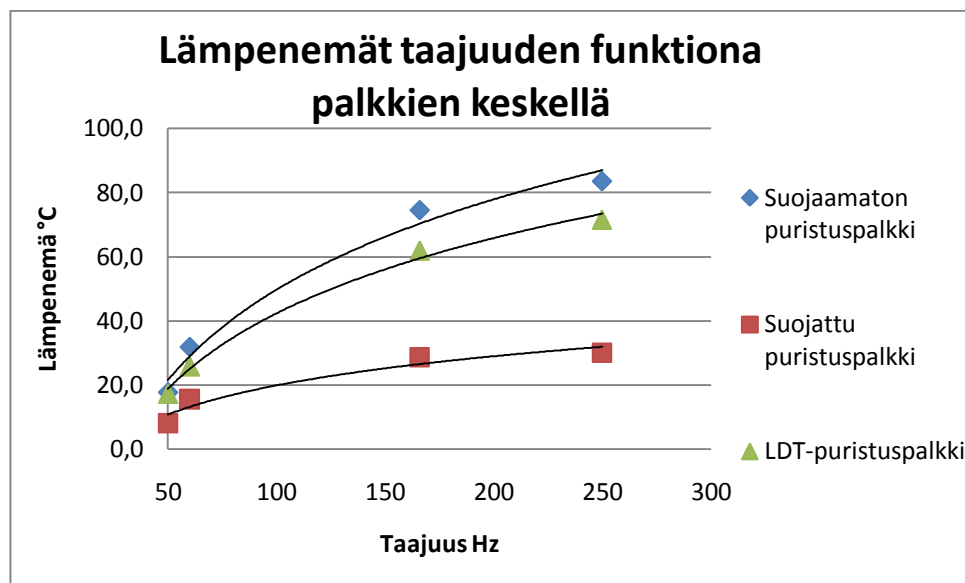
$$\Delta T_{Cu}(r) = 4,06^{\circ}\text{C} \left(\frac{r}{b}\right)^{-0,776} \quad (6-23)$$

$$\Delta T_{LDT}(r) = 8,90^{\circ}\text{C} \left(\frac{r}{b}\right)^{-0,495} \quad (6-24)$$

6.3.3 Taajuuden vaikutus puristuspalkkien lämpenemään

Syöttövirran taajuuden vaikutusta palkkien lämpenemään tutkittiin neljällä ko-
keella. Syöttövirta pidettiin 7 kA sekä virtakiskoston ja puristuspalkkien etäisyys
80 mm. Taajuutta muutettiin 50 Hz ja 250 Hz välillä.

Palkkien kuumimmat alueet syntyivät samalla tavalla kuin virran vaikutusta tut-
kittaessa kohdassa 6.3.1.



Kuva 31 Puristuspalkkien lämpenemät syöttövirran taajuuden funktiona palkkien keskeltä mitattuna. Syöttövirta 5 kA sekä virtakiskoston ja palkkien etäisyys 80 mm.

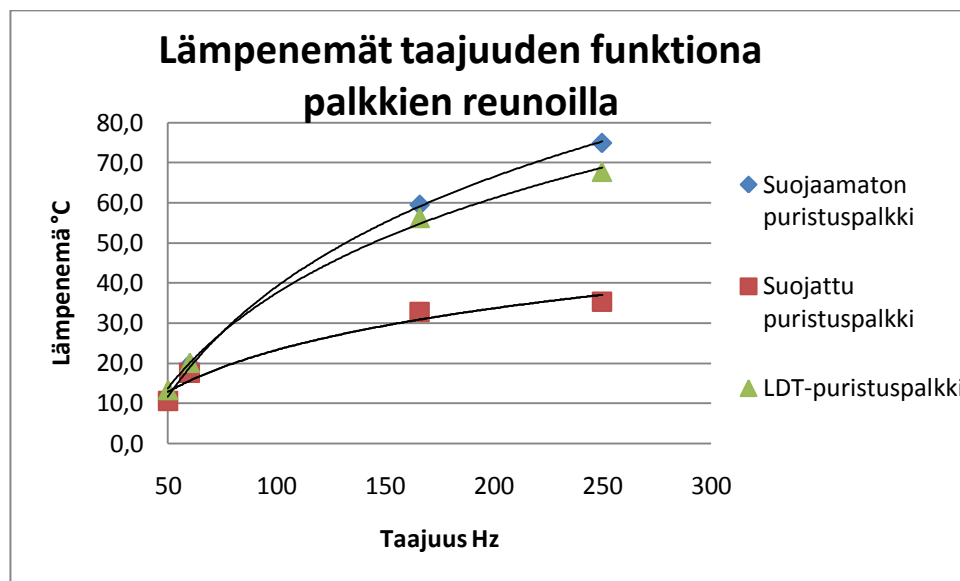
Kuvasta 31 nähdään, että pienemmillä taajuuksilla palkkien lämpenemät eivät huomattavasti eroa toisistaan. Kuparilla suojatun palkin lämpenemä jää suojaamattomasta ja LDT-puristuspalkista heikommaksi.

Mittaustuloksista saadaan johdettua yhtälöt lämpenemälle syöttövirran taajuuden funktiona palkkien keskeltä mitattuna. Suojaamattoman puristuspalkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-25 ja kuparilla suojatun puristuspalkin lämpenemälle yhtälö 6-26. LDT-puristuspalkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-27.

$$\Delta T_{Aust}(f) = 0,503^{\circ}\text{C}(cf)^{0,960} \quad (6-25)$$

$$\Delta T_{Cu}(f) = 0,41^{\circ}\text{C}(cf)^{0,816} \quad (6-26)$$

$$\Delta T_{LDT}(f) = 0,63^{\circ}\text{C}(cf)^{0,878} \quad (6-27)$$



Kuva 32 Puristuspalkkien lämpenemät syöttövirran taajuuden funktiona palkkien reunoilta mitattuna. Syöttövirta 5 kA sekä virtakiskoston ja palkkien etäisyys 80 mm.

Kuvasta 31 ja 32 nähdään, että taajuuden vaihtelun vaikutus puristuspalkkien reunoihin ja keskiosaan on lähes samankaltainen. Kuparilla suojatun palkin lämpenemä on kummassakin tapauksessa suojaamatonta puristuspalkkia ja LDT-puristuspalkkia heikompi.

Mittaustuloksista saadaan johdettua yhtälöt lämpenemälle syöttövirran taajuuden funktiona palkkien reunoilta mitattuna. Suojaamattoman puristuspalkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-28 ja kuparilla suojatun puristuspalkin lämpenemälle yhtälö 6-29. LDT-puristuspalkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-30.

$$\Delta T_{Aust}(f) = 0,12^{\circ}\text{C}(cf)^{1,20} \quad (6-28)$$

$$\Delta T_{Cu}(f) = 0,67^{\circ}\text{C}(cf)^{0,749} \quad (6-29)$$

$$\Delta T_{LDT}(f) = 0,29^{\circ}\text{C}(cf)^{1,011} \quad (6-30)$$

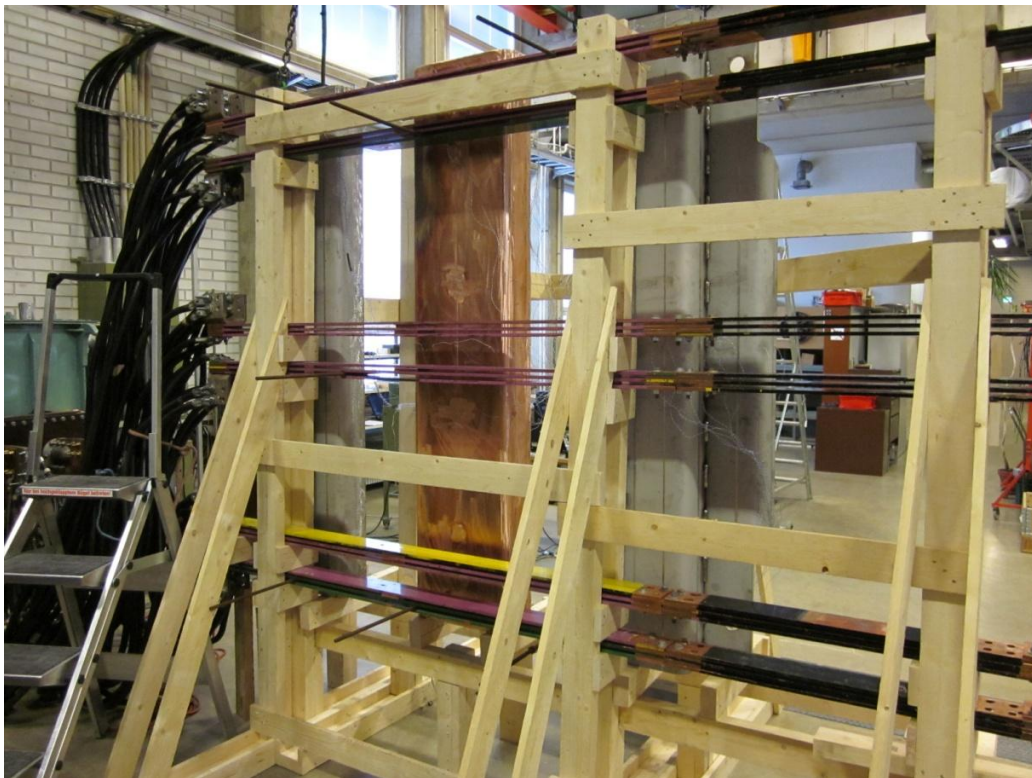
6.4 Puristuspalkit kolmivaihekiskostoon nähden poikittain

Koe suoritettiin samoilla kappaleilla kuin kohdassa 6.3, mutta testikappaleet asetettiin vaihekiskostoon nähden poikittain. Tässä testissä kappaleet aseteltiin siten, että neutraalin virtakiskon vaikutus testikappaleeseen V olisi mahdollisimman vähäinen. Lämpötila-anturit sijoitettiin samalla tavalla kuin kohdassa 6.3. 13 anturia palkkien ympärillä keskiosassa ja 13 kappaletta palkkien yläreunassa. Puristus-palkkien keskiosassa olevat anturit olivat virtakiskoston keskimmäisen vaiheen kohdalla ja palkkien reunassa olevat anturit noin 130 mm ensimmäisen vaiheen yläpuolella. Palkkien asettelu ja lämpötila-anturien sijainnit on kuvattu liitteessä 2.

Puristuspalkkien kuumimmat kohdat syntyivät samalla tavalla kuin kohdassa 6.3, missä palkit olivat virtakiskostoon nähden samansuuntaisesti. Suojaamattomassa palkissa kuumimmat kohdat syntyivät kohtiin, jotka olivat lähinnä kiskostoa. Suojatussa palkissa kuumimmat kohdat syntyivät kulmiin kuparisuojauksen reunoille. LDT-puristus-palkissa suurimmat lämpenemät mitattiin palkin taivutetusta reunasta, sekä kiskostoa lähinnä olevasta kohdasta.



Kuva 33 Puristuspalkit virtakiskostoon nähden poikittain. Vasemmalla LDT-puristuspalkki, keskellä kuparilla suojattu magneettinen puristuspalkki ja oikealla suojaamaton epämagneettinen puristuspalkki.

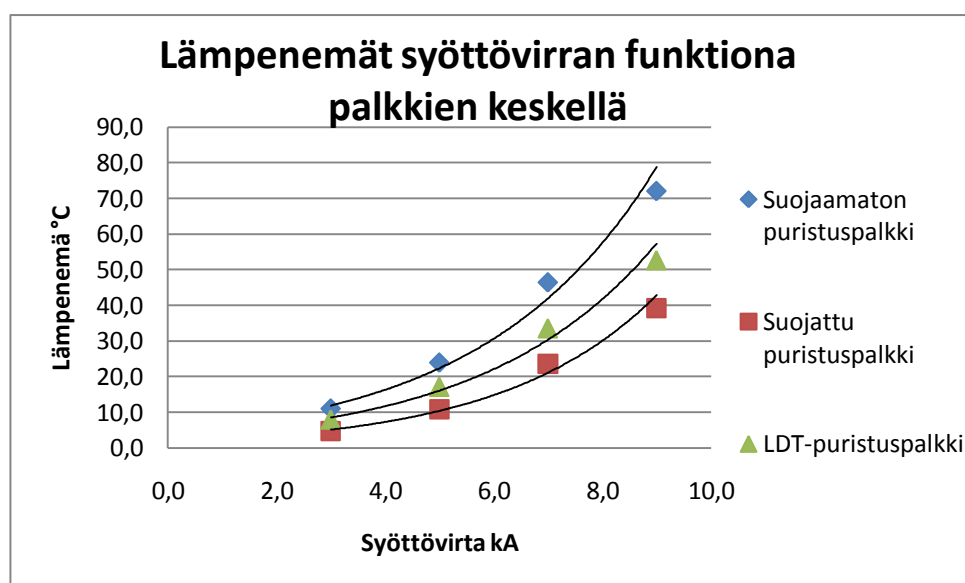


Kuva 34 Puristuspalkit virtakiskoston puolelta kuvattuna.

6.4.1 Virran vaikutus palkkien lämpenemään

Syöttövirran suuruuden vaikutusta puristuspalkkien lämpenemään tutkittiin neljällä kokeella. Etäisyys palkkien ja virtakiskoston välillä oli 80 mm ja syöttövirran taajuus 50 Hz. Syöttövirtaa muutettiin välillä 3 kA – 9 kA.

Syöttövirran vaikutusta tutkittaessa puristuspalkkien lämpenemät olivat hieman suuremmat palkkien ollessa poikittain virtakiskostoon nähden. Lämpenemät jäivät kuitenkin palkkien reunoissa pienemmiksi kuin palkkien keskeltä mitattuna.



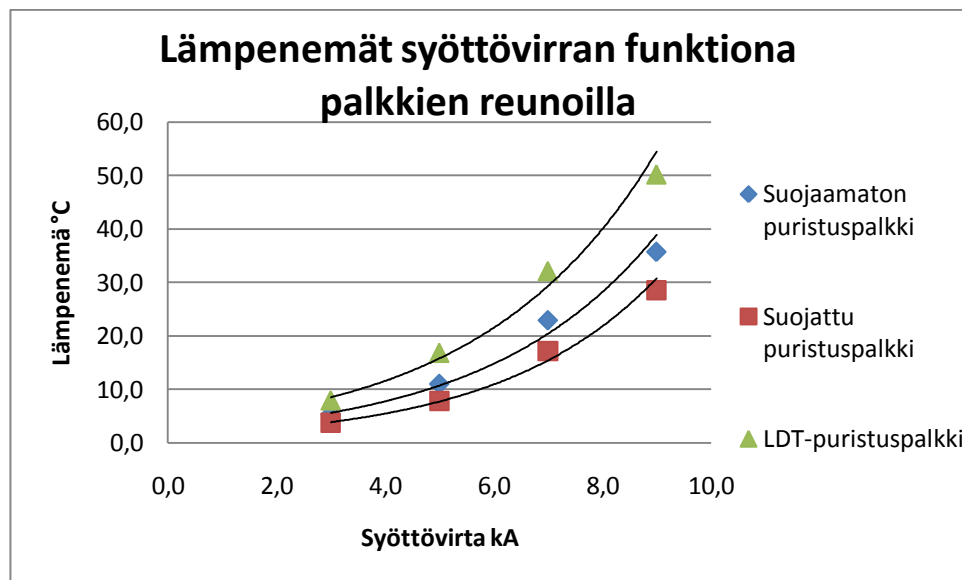
Kuva 35 Puristuspalkkien lämpenemät syöttövirran funktiona palkkien keskeltä mitattuna. Virtakiskoston ja palkkien etäisyys 80 mm sekä syöttövirran taajuus 50 Hz.

Kuvasta 35 nähdään, että palkkien lämpenemien kasvunopeus on lähes samanlainen kaikilla testikappaleilla. Mittaustuloksista saadaan johdettua yhtälöt lämpenemälle syöttövirran funktiona palkkien keskeltä mitattuna. Suojaamattoman puristuspalkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-31 ja kuparilla suojatun puristuspalkin lämpenemälle yhtälö 6-32. LDT-puristuspalkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-33.

$$\Delta T_{Aust}(I) = 1,22 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \left(\frac{I}{a}\right)^{1,710} \quad (6-31)$$

$$\Delta T_{Cu}(I) = 1,08 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} \left(\frac{I}{a}\right)^{1,912} \quad (6-32)$$

$$\Delta T_{LDT}(I) = 7,63 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} \left(\frac{I}{a}\right)^{1,726} \quad (6-33)$$



Kuva 36 Puristuspalkkien lämpenemät syöttövirran funktiona palkkien reunoilta mitattuna. Virtakiskoston ja palkkien etäisyys 80 mm sekä syöttövirran taajuus 50 Hz.

Kuvasta 36 nähdään, että LDT-puristuspalkki lämpenee huomattavasti enemmän palkin reunasta kuin suojaamaton puristuspalkki. Verrattaessa tulosta kuvaan 33, huomataan että palkkien keskeltä mitattuna lämpenemä on suurempi suojaamattomalla puristuspalkilla. Suojaamattoman puristuspalkin lämpenemä on palkin reunalta mitattaessa lähes 50 % pienempi kuin palkin keskeltä mitattaessa. Tulokseen vaikuttaa kuitenkin hieman syöttövirran epätasaisuus eri vaiheiden välillä.

Mittaustuloksista saadaan johdettua yhtälöt lämpenemälle syöttövirran funktiona palkkien reunoilta mitattuna. Suojaamattoman puristuspalkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-34 ja kuparilla suojatun puristuspalkin lämpenemälle yhtälö 6-35. LDT-puristuspalkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-36.

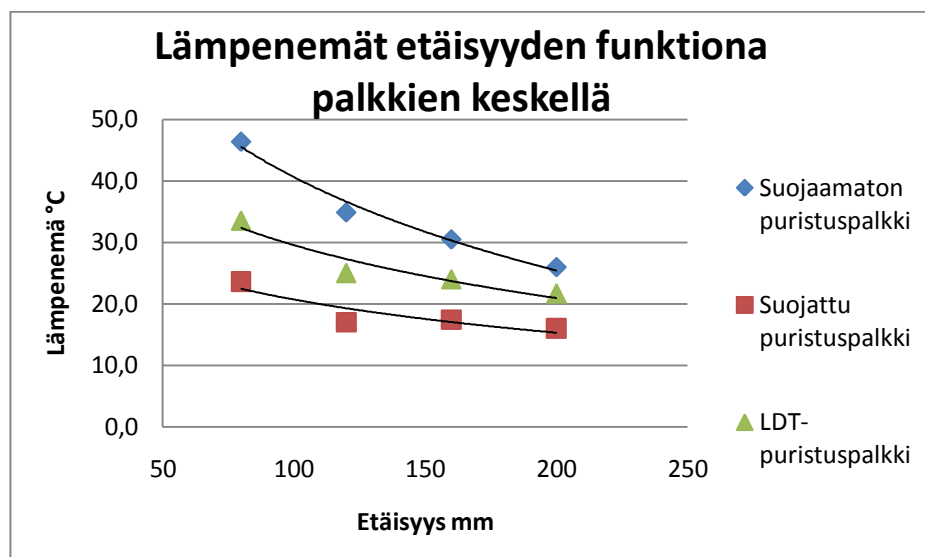
$$\Delta T_{Aust}(I) = 4,69 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} \left(\frac{I}{a}\right)^{1,736} \quad (6-34)$$

$$\Delta T_{Cu}(I) = 2,63 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} \left(\frac{I}{a}\right)^{1,768} \quad (6-35)$$

$$\Delta T_{LDT}(I) = 1,08 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \left(\frac{I}{a}\right)^{1,683} \quad (6-36)$$

6.4.2 Johtimien ja puristuspalkkien välisen etäisyyden vaikutus palkkien lämpenemään

Etäisyyden vaikutusta puristuspalkkien lämpenemään tutkittiin neljälle kokeella. Etäisyyttä muutettiin välillä 80 mm – 200 mm.



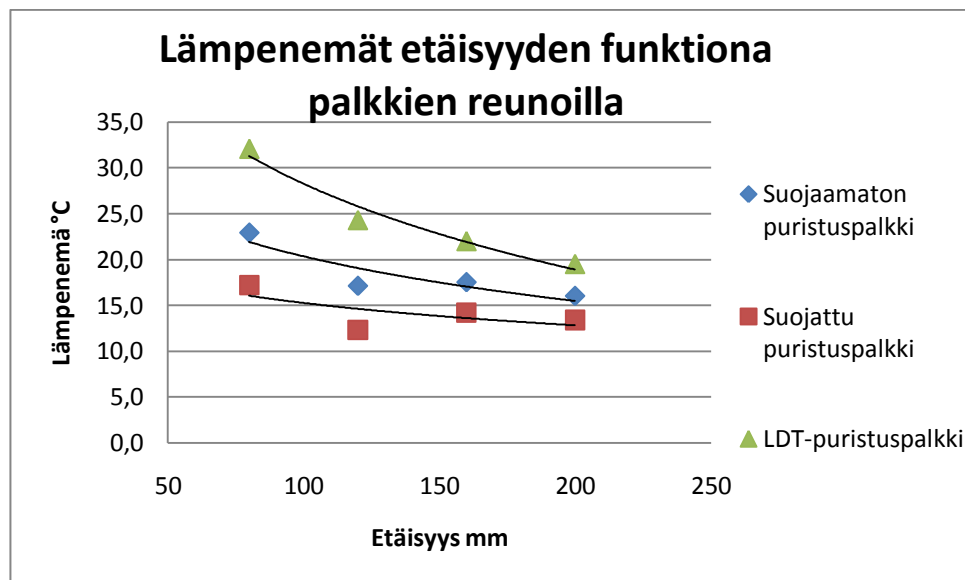
Kuva 37 Puristuspalkkien lämpenemät virtakiskoston ja palkkien etäisyyden funktiona palkkien keskeltä mitattuna. Syöttövirta on 7 kA ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

Mittaustuloksista saadaan johdettua yhtälöt lämpenemälle virtakiskoston ja palkkien etäisyyden funktiona palkkien keskeltä mitattuna. Suojaamattoman puristus-palkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-37 ja kuparilla suojatun puristus-palkin lämpenemälle yhtälö 6-38. LDT-puristus-palkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-39.

$$\Delta T_{Aust}(r) = 9,38^{\circ}\text{C} \left(\frac{r}{b}\right)^{-0,632} \quad (6-37)$$

$$\Delta T_{Cu}(r) = 7,78^{\circ}\text{C} \left(\frac{r}{b}\right)^{-0,424} \quad (6-38)$$

$$\Delta T_{LDT}(r) = 9,87^{\circ}\text{C} \left(\frac{r}{b}\right)^{-0,474} \quad (6-39)$$



Kuva 38 Puristus-palkkien lämpenemät virtakiskoston ja palkkien etäisyyden funktiona palkkien reunoilta mitattuna. Syöttövirta on 7 kA ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

Vertaamalla kuvaa 37 ja 38, nähdään että suurin lämpenemä palkkien keskeltä mitattuna on suojaamattomalla puristus-palkilla ja reunoilta mitattuna LDT-puristus-palkilla.

Mittaustuloksista saadaan johdettua yhtälöt lämpenemälle virtakiskoston ja palkkien etäisyyden funktiona palkkien reunoilta mitattuna. Suojaamattoman puristus-palkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-40 ja kuparilla suojatun puristus-palkin lämpenemälle yhtälö 6-41. LDT-puristus-palkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-42.

$$\Delta T_{Aust}(r) = 8,27^{\circ}\text{C} \left(\frac{r}{b}\right)^{-0,391} \quad (6-40)$$

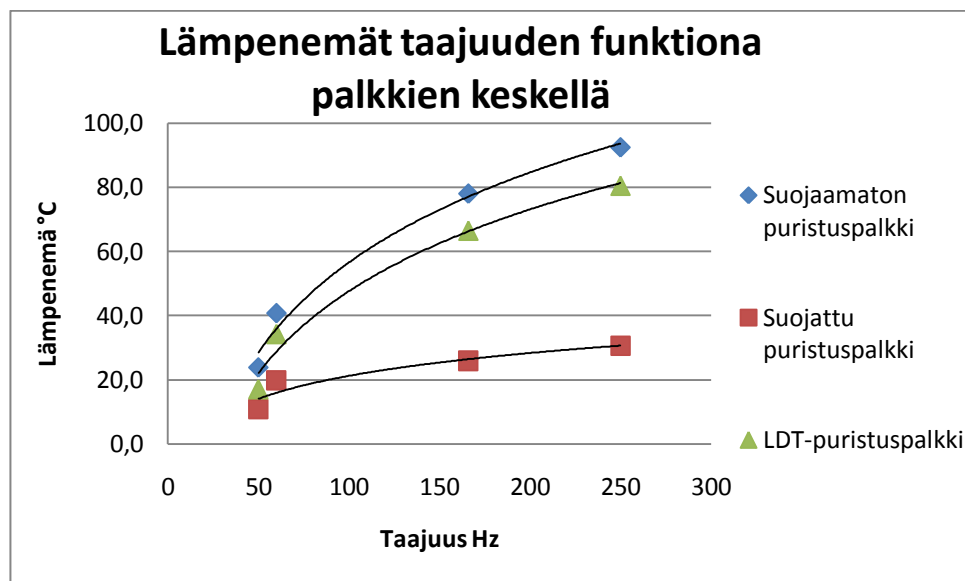
$$\Delta T_{Cu}(r) = 8,21^{\circ}\text{C} \left(\frac{r}{b}\right)^{-0,272} \quad (6-41)$$

$$\Delta T_{LDT}(r) = 8,00^{\circ}\text{C} \left(\frac{r}{b}\right)^{-0,544} \quad (6-42)$$

Yhtälöitä vertaamalla huomataan, että suojaamattoman ja suojatun palkin lämpenemän kasvunopeus on lähes 40 % suurempi palkkien keskikohdassa kuin reunoissa.

6.4.3 Taajuuden vaikutus palkkien lämpenemään

Syöttövirran taajuuden vaikutusta puristuspalkkien lämpenemään tutkittiin neljällä kokeella. Syöttövirta oli kokeiden aikana 5 kA sekä virtakiskoston ja puristus-palkkien etäisyys 80 mm. Syöttövirran taajuutta muutettiin välillä 50 Hz – 250 Hz.



Kuva 39 Puristuspalkkien lämpenemät syöttövirran taajuuden funktiona palkkien keskeltä mitattuna. Virtakiskoston ja palkkien etäisyys 80 mm sekä syöttövirta 5 kA.

Pienemmillä taajuuksilla puristuspalkkien lämpenemillä ei ole merkittävää eroa, mutta suuremmilla taajuuksilla suojaamaton puristus-palkki sekä LDT-

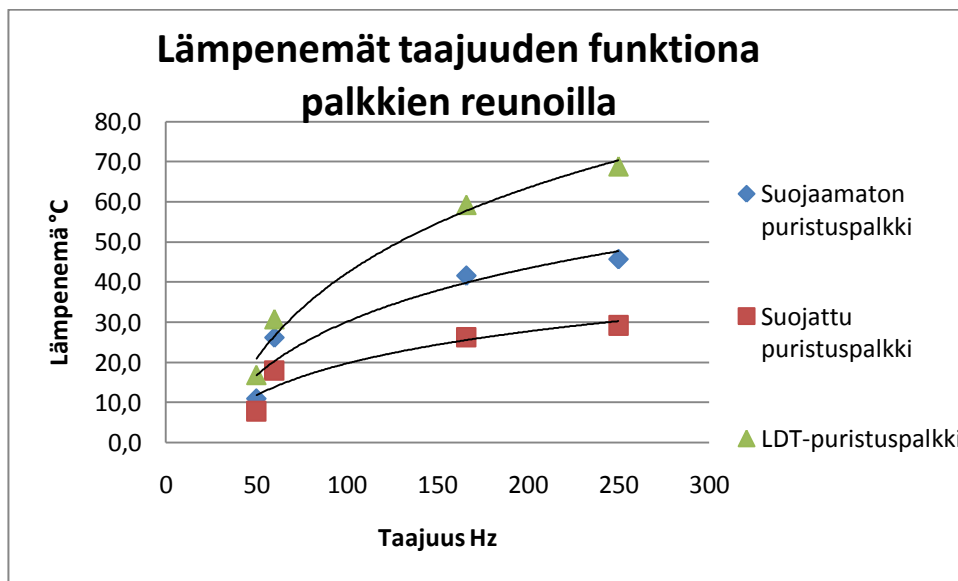
puristuspalkki lämpenevät huomattavasti enemmän. Suojatun palkin lämpenemän kasvunopeus jää selvästi heikommaksi muihin palkkeihin verrattuna.

Mittaustuloksista saatiin johdettua yhtälöt puristuspalkkien lämpenemälle syöttövirran taajuuden funktiona palkkien keskikohdasta mitattuna. Suojaamattoman puristuspalkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-37 ja kuparilla suojatun puristuspalkin lämpenemälle yhtälö 6-38. LDT-puristuspalkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-39.

$$\Delta T_{Aust}(f) = 1,04^{\circ}\text{C}(cf)^{0,840} \quad (6-37)$$

$$\Delta T_{Cu}(f) = 1,02^{\circ}\text{C}(cf)^{0,647} \quad (6-38)$$

$$\Delta T_{LDT}(f) = 0,49^{\circ}\text{C}(cf)^{0,963} \quad (6-39)$$



Kuva 40 Puristuspalkkien lämpenemät syöttövirran taajuuden funktiona palkkien reunoilta mitattuna. Virtakiskoston ja palkkien etäisyys 80 mm sekä syöttövirta 5 kA.

Puristuspalkkien reunoilla lämpenemät jäävät keskikohtaa heikommiksi. Kun verrataan kuvaa 39 ja 40, huomataan että LDT-puristuspalkin lämpenemä on reunalta mitattaessa suurempi kuin suojaamattoman palkin. Keskeltä mitattaessa tilanne on päinvastainen. Suojaamattoman puristuspalkin lämpenemä on palkin reunalla noin

50 % pienempi kuin palkin keskellä. Suojatun palkin lämpenemä on lähes sama puristuspalkin reunalla ja keskellä.

Mittaustuloksista saatiin johdettua yhtälöt puristuspalkkien lämpenemälle syöttövirran taajuuden funktiona palkkien reunoista mitattuna. Suojaamattoman puristuspalkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-40 ja kuparilla suojatun puristuspalkin lämpenemälle yhtälö 6-41. LDT-puristuspalkin lämpenemälle voidaan kirjoittaa yhtälö 6-42.

$$\Delta T_{Aust}(f) = 0,46^{\circ}C(cf)^{0,885} \quad (6-40)$$

$$\Delta T_{Cu}(f) = 0,42^{\circ}C(cf)^{0,820} \quad (6-41)$$

$$\Delta T_{LDT}(f) = 0,66^{\circ}C(cf)^{0,876} \quad (6-42)$$

7 YHTEENVETO

Työ oli jaettu kahteen pääkokonaisuuteen. Ensimmäisessä osassa käsiteltiin muuntajan sekä sen rakenteiden lämpenemiseen vaikuttavia sähkömagneettisia ilmiöitä ja lämpöoppia. Tärkeimpinä ilmiöinä voidaan pitää Amperen lakia, jonka mukaan virrallisen johtimen ympärille muodostuu magneettikenttä ja Faradayn induktiolakia, jonka mukaan muuttuva magneettikenttä saa aikaan pyörrevirtoja johtavassa materiaalissa. Tärkeimpiä lämpöopillisia ilmiöitä olivat lämmön siirtymistavat.

Toinen osa keskittyi laboratoriossa tehtyjen mittausten esittelyyn sekä analysointiin. Laboratoriomittausten ja tietokonelaskelmien avulla selvitettiin lämpenemän riippuvuudet syöttövirrasta, syöttövirran taajuudesta sekä johtimien ja testikappaleen etäisyydestä. Testikappaleina käytettiin erilaisia epämagneettisia teräslevyjä ja muuntajan sydämessä käytettäviä puristuspalkeja. Puristuspalkeiden lämpenemää tutkittiin lisäksi eri asennoilla virtakiskostoon nähden. Mittaukset tehtiin myös ratkaisuun, jossa epämagneettinen teräs suojattiin kuparilla. Kuparisuojan tarkoituksena oli toimia pyörrevirtasuojana ja tulosten perusteella kupari on tehokas suoja lämpenemän ehkäisemiseksi.

Tulosten perustella johdettiin yhtälöt testikappaleille. Yhtälöillä voidaan laskea lämpenemät tilanteissa, joissa kappaletta ympäröivänä aineena on ilma. Todellisessa tilanteessa muuntajan rakenteiden ympäröivänä aineena on myös öljy, joka on jäähdyttimenä moninkertaisesti ilmaa tehokkaampi. Tällöin lämpenemä jää mitatuista lämpenemistä pienemmäksi.

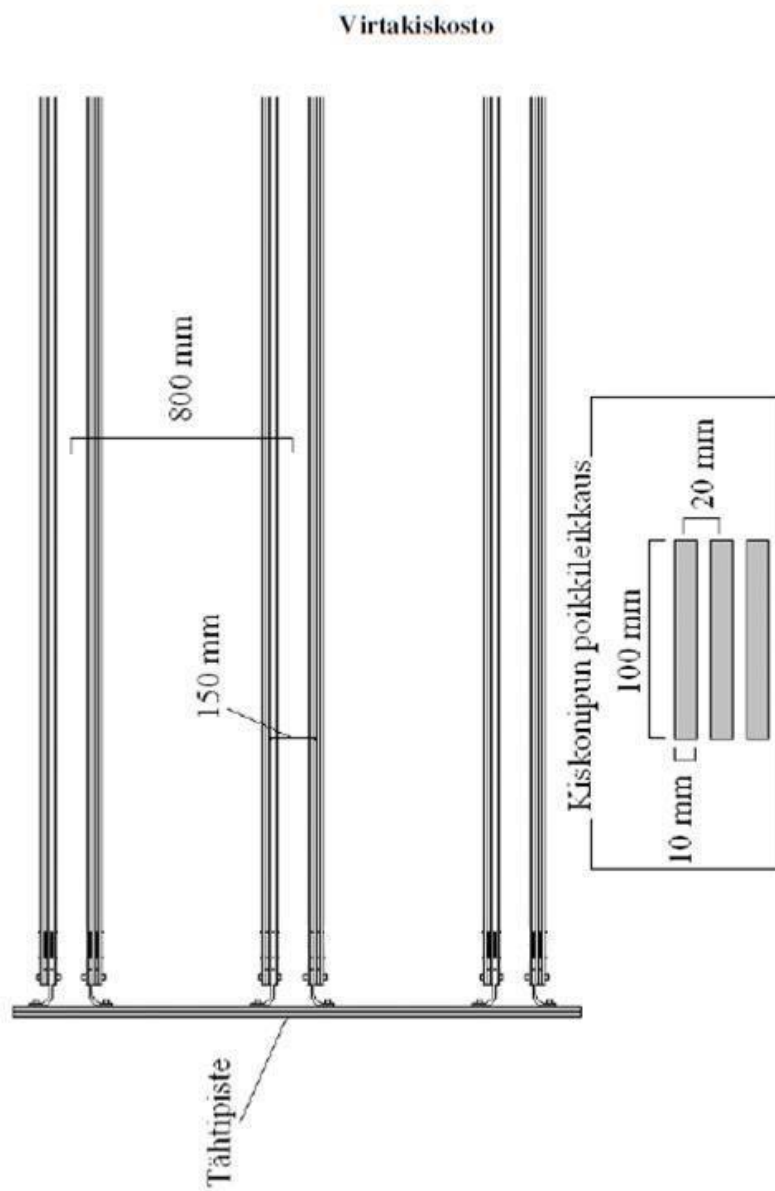
Työn tavoitteena oli tehdä mittaukset mahdollisimman samankaltaisesti vuonna 2006 tehtyjen mittausten kanssa ja tässä myös onnistuttiin. Virtakiskosto rakennettiin samanlaiseksi kuin edellisissä mittauksissa ja tulokset olivat verrattavissa. Ongelmia mittauksissa aiheutti ainoastaan levyjen taipuminen suurilla lämpötiloilla sekä vaihevirtojen epätasaisuus. Taipumisen vaikutus tuloksiin oli kuitenkin melko vähäinen, sillä levyjen mittauspisteet saatiin pidettyä melko hyvin oikealla etäisyydellä. Lopputuloksena saatiin varsin kattavat tulokset ja yhtälöt epämagneettisten rakenteiden lämpenemälle suurvirtajohtimien läheisyydessä.

8 LÄHDELUETTELO

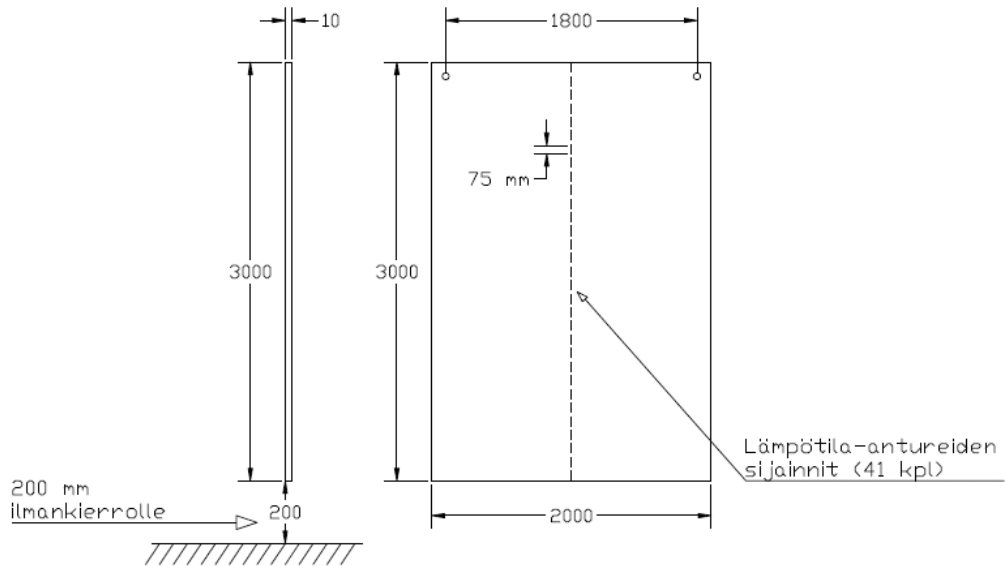
- /1/ ABB. 2004. Transformer Handbook 2. edition. ABB Zurich, Switzerland.
- /2/ ABB. 2007. Muuntajatekniikan perusteet. Opintomoniste.
- /3/ Flanagan, William M. 1993. Handbook of transformers design and applications.
- /4/ Heinonen, Janne 2006. Tehomuuntajan rautaosien lämpeneminen suurvirtajohtimien läheisyydessä. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto.
- /5/ Honkanen, H. Muuntajat. Opintomoniste. Kajaanin ammattikorkeakoulu.
- /6/ Inkinen Pentti, Manninen Reijo & Tuohi Jukka. 2002. Momentti 2 insinöörifysiikka. Oppikirja.
- /7/ Inkinen Pentti, Tuohi Jukka 1999. Momentti 1 insinöörifysiikka. Oppikirja.
- /8/ Lehtonen, M. 11/84. Yliaallot ja niiden haittavaikutukset teollisuuden jakeluverkoissa. Sähkö 57-lehti. 70-74s.
- /9/ Nevanlinna, Heikki 4/01. 200 vuotta sähkövirtaa. 38-41s.
- /10/ Niittymäki, R. 1990. Loistehon kompensoinnin ja yliaaltojen aiheuttamat häiriöt Valkeakosken energialaitoksen sähköverkossa. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu.
- /11/ Ruppaa, Erkki 2004. Maxwellin yhtälöt. Opintomoniste. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Tekniikka ja merenkulku Pori.

- /12/ Valjus, Mikko 2005. Moniensioinen muuntaja taajuusmuuttajakäytössä. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- /13/ Willmen, Juha 26.4.2006. Sähkönjakelu prosessiteollisuudessa.

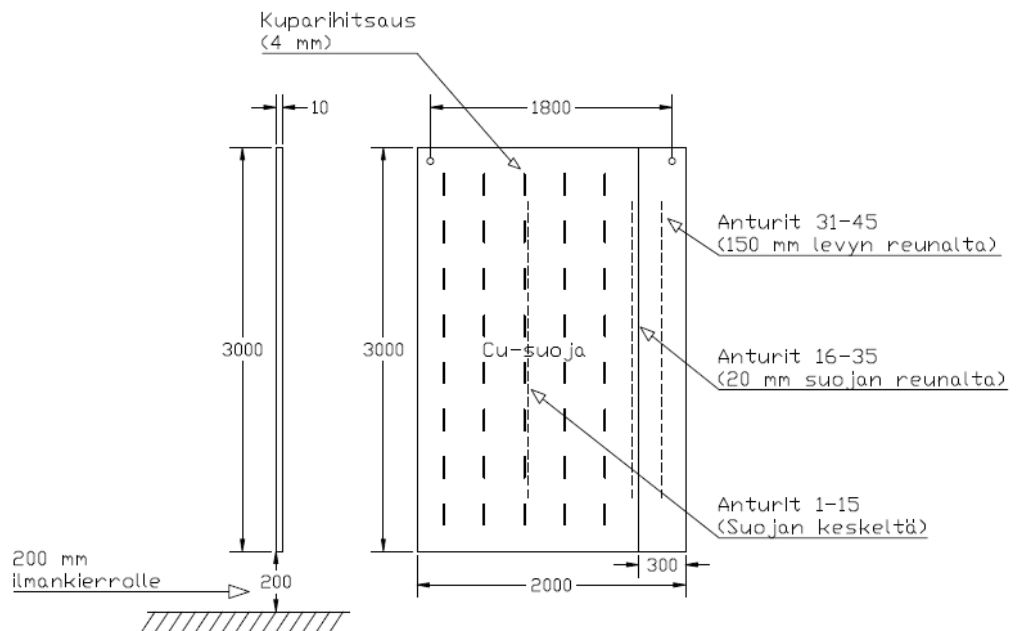
Liite 1 Virtakiskosto, testikappaleet ja lämpötila-antureiden sijainnit



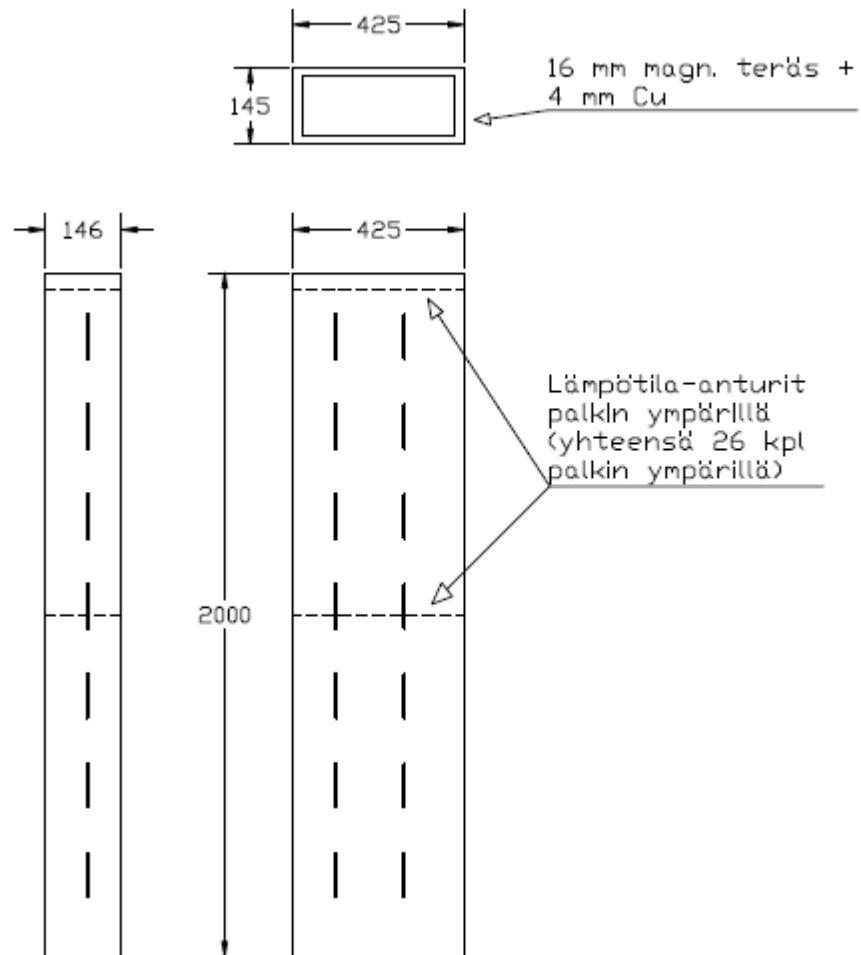
**Testikappale 1
(Suojaamaton teräslevy)**



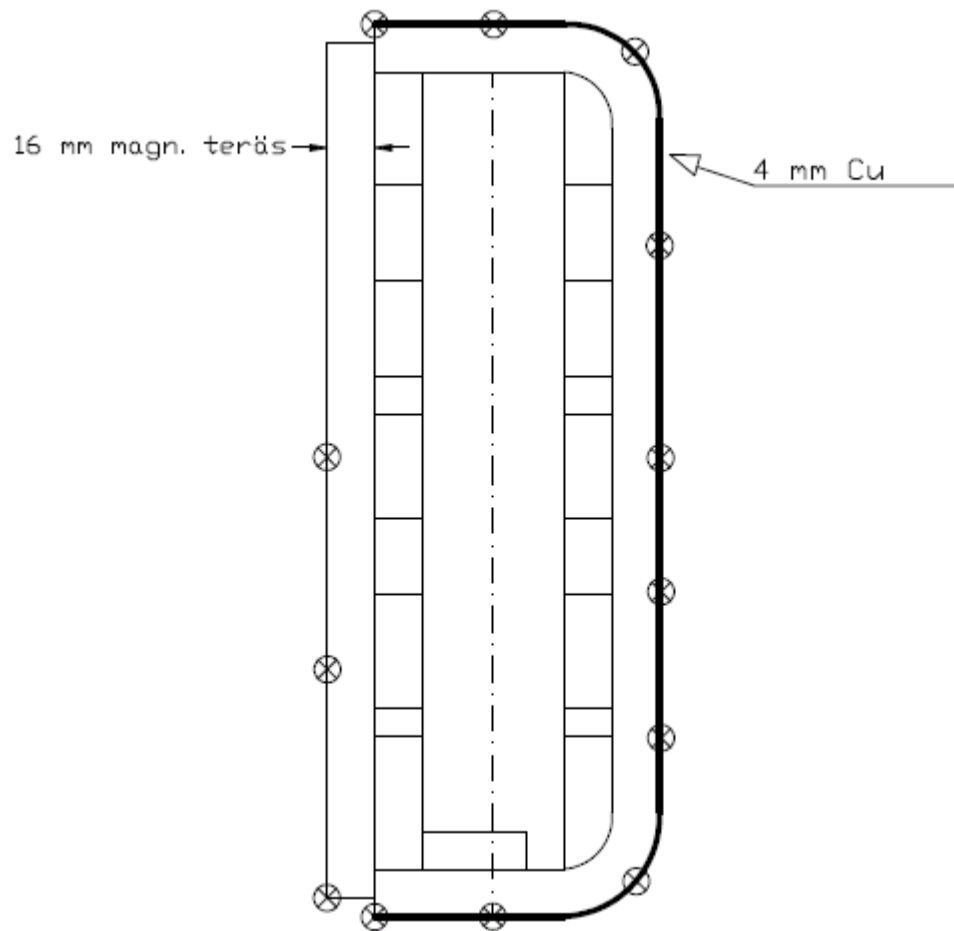
**Testikappale 2
(Cu- suojattu teräslevy)**



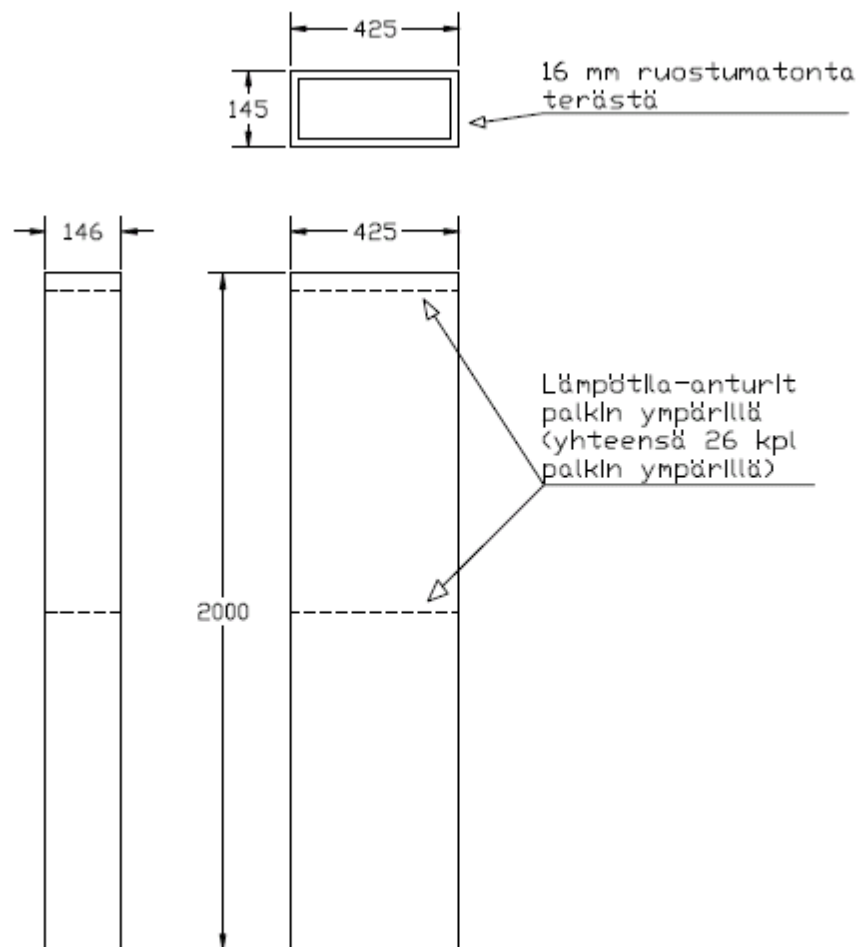
Testikappale 3
(Cu- suojattu puristuspaalkki)



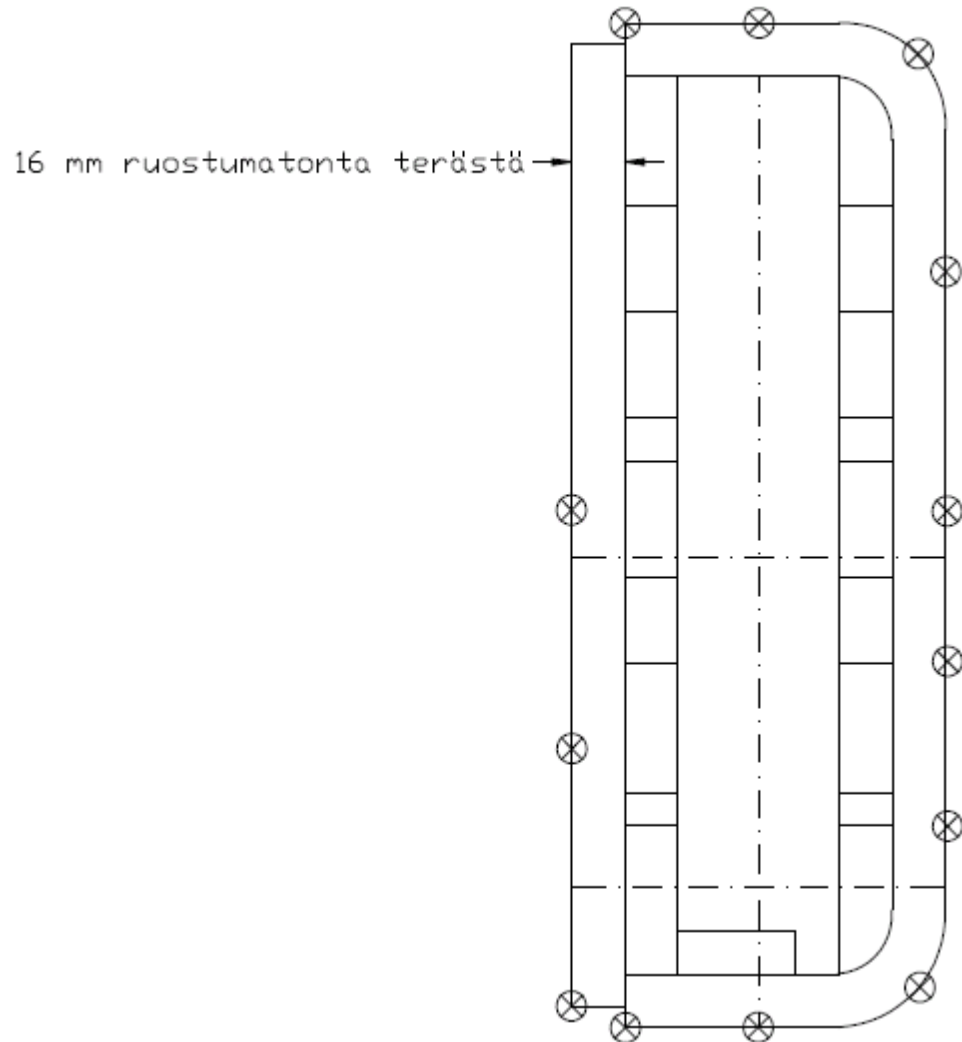
Testikappale 3
(Cu- suojattu puristuspaikki, lämpöanturien sijainnit)



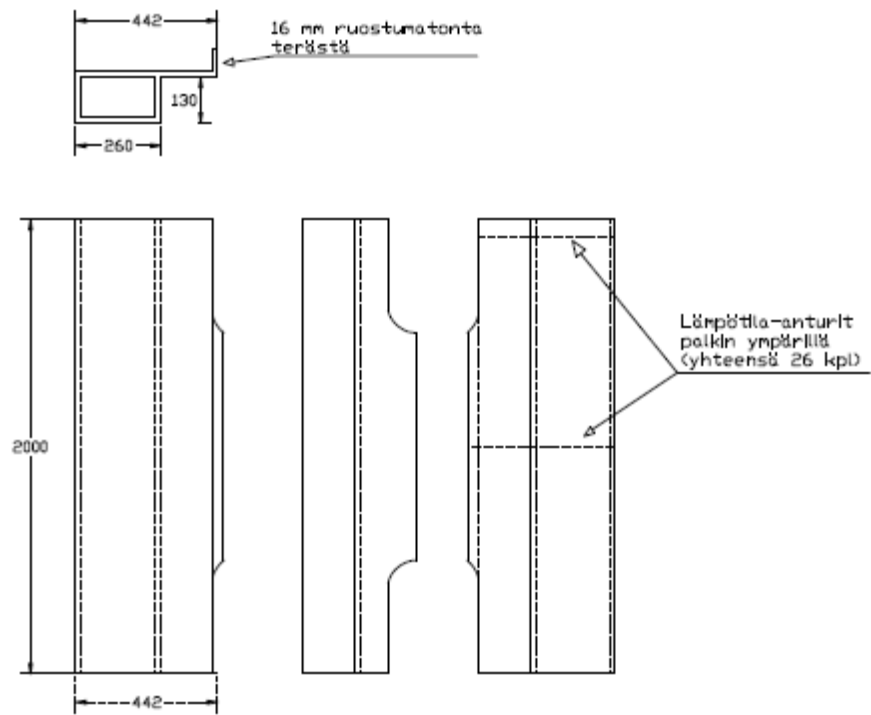
Testikappale 4
(Suojaamaton puristuspalkki, ruostumatonta terästä)



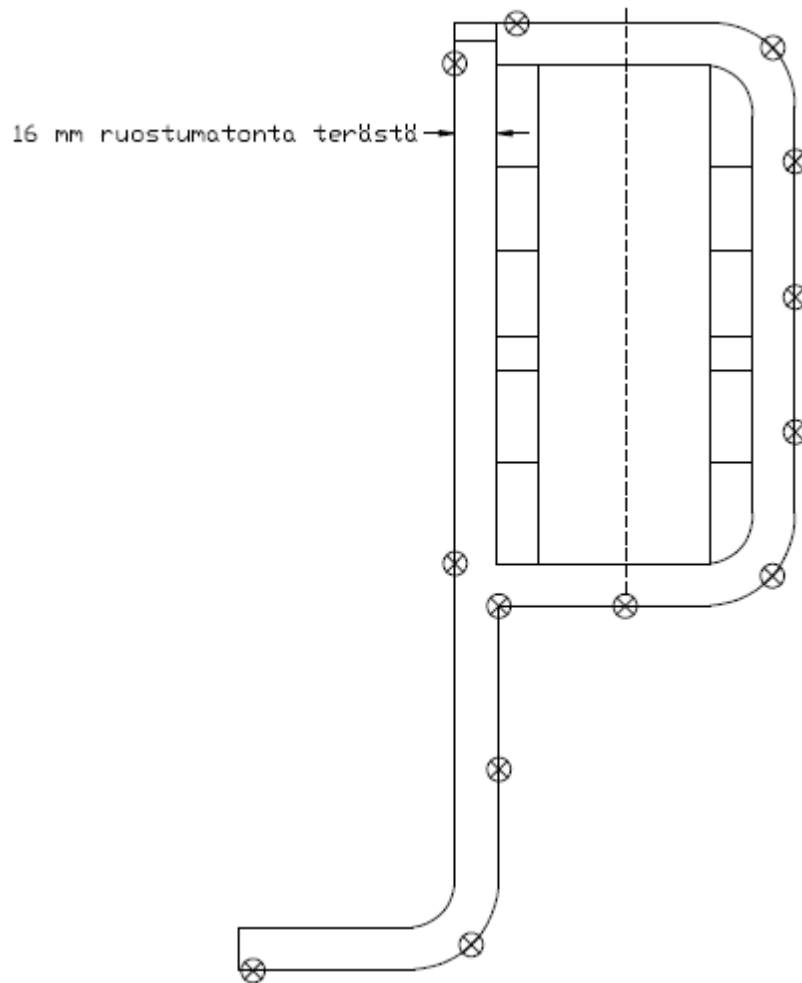
Testikappale 4
(Suojaamaton puristuspaikki, lämpöanturien sijainnit)



Testikappale 5 (LDT-puristuspaalkki)

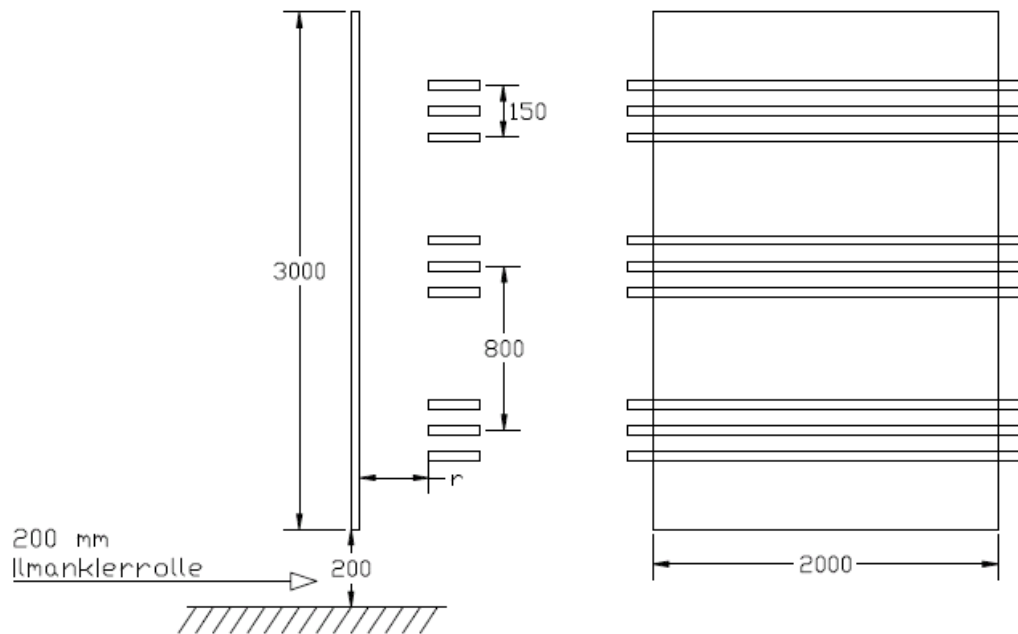


Testikappale 5
(LDT-puristuspaalkki, lämpöanturien sijainnit)

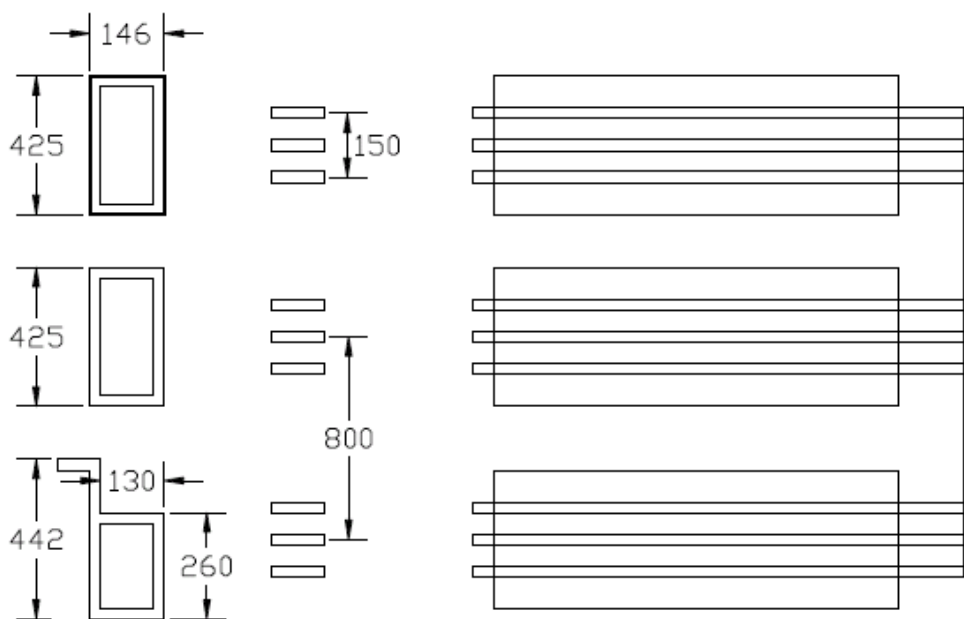


Liite 2 Mittausjärjestelyt

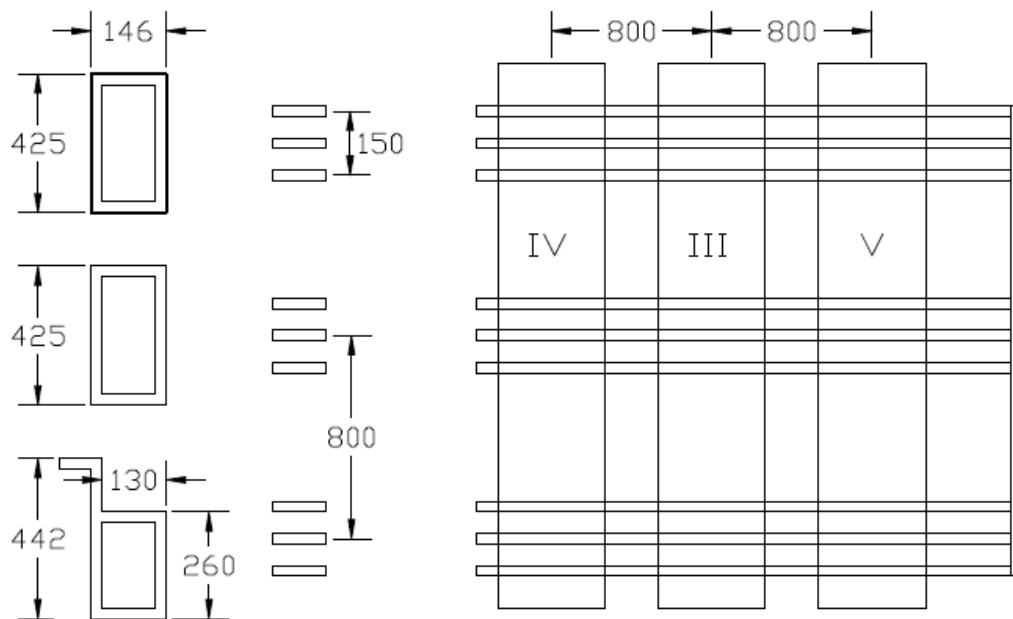
Testit 1 ja 2



Testit 3a, 4a ja 5a



Testit 3b, 4b ja 5b



Liite 3 Lämpenemiskokeiden tulokset

1. Suojaamaton epämagneettinen teräslevy

Suojaamattoman austeniitti teräslevyn lämpenemää tutkittiin laboratorioskokeilla 10 kA virtaan asti. Mittaukset suoritettiin syöttövirran, kiskoston ja levyn etäisyyden, sekä syöttövirran taajuuden funktiona.

1.1 Syöttövirran vaikutus levyn lämpenemään

Syöttövirran vaikutusta levyn lämpenemään tutkittiin neljälle kokeella. Virtakiskoston ja levyn etäisyys pidettiin 80 mm ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

Taulukko 2 Suojaamattoman teräslevyn lämpötila, ympäristön lämpötila ja levyn lämpenemä keskimmäisen vaiheen kohdalla eri virran arvoilla.

I (kA)	T (°C)	T _{ymp} (°C)	ΔT (°C)
9,0	191,1	23,6	167,5
7,0	144,1	24,1	120,0
4,9	98,8	24,1	74,7
3,0	51,2	22,1	29,1

Taulukko 3 Suojaamattoman teräslevyn reunojen lämpötilat ja lämpenemät eri syöttövirroilla.

I (kA)	T _{vasen} (°C)	T _{oikea} (°C)	ΔT _{vasen} (°C)	ΔT _{oikea} (°C)	T _{ymp} (°C)
9,0	208,0	224,0	184,6	200,4	23,6
7,0	164,0	173,0	139,9	148,9	24,1
4,9	113,0	123,0	88,9	98,9	24,1
3,0	56,0	61,0	33,9	38,9	22,1

Taulukko 4 Ace-tietokoneohjelmalla lasketut tehoiheyksien arvot eri virroilla ja suurinta tehoiheyttä vastaava lämpenemä. Levyn ja kiskoston välinen etäisyys on 80 mm ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

I (kA)	P_v (MW/m ³)	ΔT (°C)
10,0	0,78	199,49
12,0	1,13	276,02
15,0	1,62	378,43
18,0	1,98	451,16
20,0	2,36	526,17
25,0	3,21	688,89

1.2 Virtakiskoston ja levyn etäisyyden vaikutus levyn lämpenemään

Virtakiskoston ja levyn etäisyyden vaikutusta lämpenemään tutkittiin neljällä eri etäisyydellä. Etäisyyttä muutettiin 80 mm ja 200 mm välillä. Virta pidettiin 7 kA ja taajuus 50 Hz.

Taulukko 5 Suojaamattoman teräslevyn lämpötila, ympäristön lämpötila ja levyn lämpenemä keskimmäisen vaiheen kohdalla eri etäisyyksillä.

r (mm)	T (°C)	T_{ymp} (°C)	ΔT (°C)
80	144,1	23,6	167,5
120	118,9	22,9	96,0
160	102,2	23,5	78,8
200	86,9	23,6	63,3

Taulukko 6 Suojaamattoman teräslevyn reunojen lämpötilat ja lämpenemät eri etäisyyksillä.

r (mm)	T_{vasen} (°C)	T_{oikea} (°C)	ΔT_{vasen} (°C)	ΔT_{oikea} (°C)	T_{ymp} (°C)
80	164,0	173,0	140,4	149,4	23,6
120	152,0	153,0	129,1	130,1	22,9
160	137,0	136,0	113,5	112,5	23,5
200	112,4	106,7	88,8	83,1	23,6

1.3 Syöttövirran taajuuden vaikutus levyn lämpenemään

Syöttövirran taajuuden vaikutusta levyn lämpenemään tutkittiin neljällä eri taajuudella. Syöttövirta pidettiin 5 kA sekä levyn ja kiskoston välinen etäisyys 80 mm.

Taulukko 7 Suojaamattoman teräslevyn lämpötila, ympäristön lämpötila ja levyn lämpenemä keskimmäisen vaiheen kohdalla eri taajuuksilla.

f (Hz)	T (°C)	T_{ymp}(°C)	ΔT (°C)
50	98,8	24,1	74,7
60	102,3	22,3	80,0
166	181,5	24,4	157,1
250	199,0	24,5	174,5

Taulukko 8 Suojaamattoman teräslevyn reunojen lämpötilat ja lämpenemät eri syöttövirran taajuuksilla.

f (Hz)	T_{vasen} (°C)	T_{oikea} (°C)	ΔT_{vasen} (°C)	ΔT_{oikea} (°C)	T_{ymp}(°C)
50	113,0	123,0	88,9	98,9	24,1
60	120,0	134,0	97,7	111,7	22,3
166	235,0	248,0	210,6	223,6	24,4
250	283,0	299,0	258,5	274,5	24,5

2. Kuparilla suojattu epämagneettinen teräslevy

Kuparilla suojatun epämagneettisen teräslevyn lämpenemää tutkittiin 12 mittauksella syöttövirran suuruuden, levyn ja virtakiskojen etäisyyden sekä syöttövirran taajuuden funktiona.

2.1 Syöttövirran vaikutus suojatun levyn lämpenemään

Syöttövirran suuruuden vaikutusta suojatun levyn lämpenemään tutkittiin neljällä kokeella. Testilevyn ja virtakiskoston välinen etäisyys pidettiin 80 mm ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

Taulukko 9 Suojatun epämagneettisen teräslevyn lämpenemät eri syöttövirroilla suojan keskellä, suojan reunassa, suojaamattomassa osassa sekä suojan vastakkaisella puolella. Kiskoston ja levyn etäisyys 80 mm ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

I (kA)	Kuparisuoja		Kuparisuojan reuna		Suojaamaton osa		Suojatun osan vastakkainen puoli		
	T (°C)	ΔT_{cu} (°C)	T (°C)	ΔT_{cu} (°C)	T (°C)	$\Delta T_{aust.}$ (°C)	T (°C)	$\Delta T_{aust.}$ (°C)	T_{ymp} (°C)
9,0	65,5	42,4	91,4	68,3	164,3	141,2	58,9	35,8	23,1
7,0	47,8	25,2	65,5	42,9	118,9	96,3	43,4	20,8	22,6
5,0	36,0	13,7	46,7	24,4	82,3	60,0	33,5	11,2	22,3
3,0	27,4	5,2	32,2	10,0	49,2	27,0	26,5	4,3	22,2

2.2 Virtakiskoston ja levyn etäisyyden vaikutus suojatun levyn lämpenemään

Virtakiskoston ja suojatun teräslevyn etäisyyden vaikutusta lämpenemään tutkittiin neljällä etäisyydellä. Syöttövirta 7 kA ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

Taulukko 10 Suojatun epämagneettisen teräslevyn lämpenemät eri virtakiskoston ja levyn välisillä etäisyyksillä suojan keskellä, suojan reunassa, suojaamattomassa osassa sekä suojan vastakkaisella puolella. Kiskoston ja levyn etäisyys 80 mm ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

r (mm)	Kuparisuoja		Kuparisuojan reuna		Suojaamaton osa		Suojatun osan vastakkainen puoli		T _{ymp} (°C)
	T (°C)	ΔT _{cu} (°C)	T (°C)	ΔT _{cu} (°C)	T (°C)	ΔT _{aust.} (°C)	T (°C)	ΔT _{aust.} (°C)	
80	47,8	25,2	65,5	42,9	118,9	96,3	43,4	20,8	22,6
120	45,3	22,2	60,7	37,6	112,0	88,9	41,5	18,4	23,1
160	43,4	19,7	56,7	33,0	101,6	77,9	40,6	16,9	23,7
200	40,9	17,2	52,7	29,0	92,5	68,8	38,6	14,9	23,7

2.3 Syöttövirran taajuuden vaikutus suojatun levyn lämpenemään

Syöttövirran taajuuden vaikutusta levyn lämpenemään tutkittiin neljällä eri taajuudella. Virtakiskoston ja levyn välinen etäisyys 80 mm ja syöttövirta 5 kA.

Taulukko 11 Suojatun epämagneettisen teräslevyn lämpenemät eri taajuuksilla suojan keskellä, suojan reunassa, suojaamattomassa osassa sekä suojan vastakkaisella puolella. Virtakiskoston ja levyn välinen etäisyys 80 mm ja syöttövirta 5 kA.

f (Hz)	Kuparisuoja		Kuparisuojan reuna		Suojaamaton osa		Suojatun osan vastakkainen puoli		T _{ymp} (°C)
	T (°C)	ΔT _{cu} (°C)	T (°C)	ΔT _{cu} (°C)	T (°C)	ΔT _{aust.} (°C)	T (°C)	ΔT _{aust.} (°C)	
50	36,0	13,7	46,7	24,4	82,3	60,0	33,5	11,2	22,3
60	43,3	19,6	56,9	33,2	100,8	77,1	40,3	16,6	23,7
166	47,4	23,9	69,7	46,2	168,2	144,7	44,5	21,0	23,5
250	45,0	21,4	70,0	46,4	187,9	164,3	42,1	18,5	23,6

3. Puristuspaikkit virtakiskostoon nähden samansuuntaisesti

Puristuspaikkien lämpenemää tutkittiin 12 mittauksella syöttövirran, johtimen ja paikkien etäisyyden sekä syöttövirran taajuuden funktiona. Paikkit olivat vaihekiskoihin nähden samansuuntaisesti siten, että jokaisen vaiheen kohdalla oli yksi mittaattava puristuspaikki.

3.1 Syöttövirran vaikutus puristuspaikkien lämpenemään

Syöttövirran vaikutusta tutkittiin neljällä eri mittauksella 3 kA – 9 kA Syöttövirroilla. Virtakiskoston ja paikkien välinen etäisyys oli 80 mm sekä syöttövirran taajuus 50 Hz.

Taulukko 12 Eri puristuspaikkien lämpenemät paikkien keskeltä syöttövirran funktiona. Virtakiskoston ja paikkien etäisyys 80 mm ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

I (kA)	Suojaamaton puristuspaikki		Suojattu puristuspaikki		LDT-puristuspaikki		
	T (°C)	ΔT_{aust} (°C)	T (°C)	ΔT_{cu} (°C)	T (°C)	ΔT_{LDT} (°C)	ΔT_{ymp} (°C)
3,0	30,2	7,8	31,2	8,8	29,8	7,4	22,4
5,0	40,3	17,8	33,1	10,6	39,9	17,4	22,5
7,0	60,0	37,0	45,4	22,4	56,8	33,8	23,0
9,0	81,9	58,6	59,2	35,9	76,0	52,7	23,3

Taulukko 13 Eri puristuspaikkien lämpenemät paikkien reunoilta syöttövirran funktiona. Virtakiskoston ja paikkien etäisyys 80 mm ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

I (kA)	Suojaamaton puristuspaikki		Suojattu puristuspaikki		LDT-puristuspaikki		
	T (°C)	ΔT_{aust} (°C)	T (°C)	ΔT_{cu} (°C)	T (°C)	ΔT_{LDT} (°C)	ΔT_{ymp} (°C)
3,0	27,3	4,9	27,0	4,6	28,0	5,6	22,4
5,0	33,3	10,8	33,1	10,6	35,8	13,3	22,5
7,0	45,6	22,6	45,4	22,4	49,6	26,6	23,0
9,0	57,8	34,5	59,2	35,9	65,8	42,5	23,3

3.2 Johtimien ja puristuspalkkien etäisyyden vaikutus palkkien lämpenemään

Etäisyyden vaikutusta tutkittiin neljällä eri mittauksella syöttövirran, johtimien ja palkkien etäisyyden sekä syöttövirran taajuuden funktiona.

Taulukko 14 Puristuspalkkien lämpenemät palkkien keskeltä virtakiskoston ja palkkien etäisyyden funktiona. Syöttövirta 7 kA ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

r (mm)	Suojaamaton puristus-palkki		Suojattu puristus-palkki		LDT-puristus-palkki		
	T (°C)	ΔT_{aust} (°C)	T (°C)	ΔT_{cu} (°C)	T (°C)	ΔT_{LDT} (°C)	ΔT_{ymp} (°C)
80	60,0	37,0	40,5	17,5	56,8	33,8	23,0
120	71,0	47,0	47,3	23,3	59,5	35,5	24,0
160	61,3	37,3	44,6	20,6	53,7	29,7	24,0
200	42,8	19,9	32,5	9,6	44,9	22,0	22,9

Taulukko 15 Puristuspalkkien lämpenemät palkkien reunoilta virtakiskoston ja palkkien etäisyyden funktiona. Syöttövirta 7 kA ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

r (mm)	Suojaamaton puristus-palkki		Suojattu puristus-palkki		LDT-puristus-palkki		
	T (°C)	ΔT_{aust} (°C)	T (°C)	ΔT_{cu} (°C)	T (°C)	ΔT_{LDT} (°C)	ΔT_{ymp} (°C)
80	45,6	22,6	45,4	22,4	49,6	26,6	23,0
120	54,5	30,5	48,8	24,8	54,2	30,2	24,0
160	47,5	23,5	45,3	21,3	48,2	24,2	24,0
200	35,7	12,8	33,9	11,0	39,8	16,9	22,9

3.3 Syöttövirran taajuuden vaikutus puristuspalkkien lämpenemään

Syöttövirran taajuuden vaikutusta puristuspalkkien lämpenemään tutkittiin neljällä kokeella. Taajuutta muutettiin välillä 50 Hz – 250 Hz.

Taulukko 16 Puristuspalkkien lämpenemät palkkien keskeltä syöttövirran taajuuden funktiona. Syöttövirta 5 kA sekä virtakiskoston ja palkkien välinen etäisyys 80 mm.

f (Hz)	Suojaamaton puristus-palkki		Suojattu puristus-palkki		LDT-puristus-palkki		
	T (°C)	ΔT_{aust} (°C)	T (°C)	ΔT_{cu} (°C)	T (°C)	ΔT_{LDT} (°C)	ΔT_{ymp} (°C)
50	40,3	17,8	30,6	8,1	39,9	17,4	22,5
60	55,0	31,9	38,7	15,6	49,0	25,9	23,1
166	98,4	74,5	52,5	28,6	85,8	61,9	23,9
250	107,1	83,5	53,7	30,1	95,1	71,5	23,6

Taulukko 17 Puristuspalkkien lämpenemät palkkien reunoilta syöttövirran taajuuden funktiona. Syöttövirta 5 kA sekä virtakiskoston ja palkkien etäisyys 80 mm.

f (Hz)	Suojaamaton puristus-palkki		Suojattu puristus-palkki		LDT-puristus-palkki		
	T (°C)	ΔT_{aust} (°C)	T (°C)	ΔT_{cu} (°C)	T (°C)	ΔT_{LDT} (°C)	ΔT_{ymp} (°C)
50	33,3	10,8	33,1	10,6	35,8	13,3	22,5
60	42,8	19,7	40,7	17,6	43,2	20,1	23,1
166	83,4	59,5	56,7	32,8	80,1	56,2	23,9
250	98,5	74,9	59,0	35,4	91,3	67,7	23,6

4. Puristuspaalkit virtakiskostoon nähden poikittain

Puristuspaalkkien lämpenemää tutkittiin 12 mittauksella syöttövirran, johtimen ja paalkkien etäisyyden sekä syöttövirran taajuuden funktiona. Paalkit olivat vaihekiskoihin nähden poikittain.

4.1 Syöttövirran vaikutus puristuspaalkkien lämpenemään

Syöttövirran suuruuden vaikutusta paalkkien lämpenemään tutkittiin neljällä kokeella. Mittaukset tehtiin 3 kA – 9 kA virroilla.

Taulukko 18 Puristuspaalkkien lämpenemät paalkkien keskeltä syöttövirran funktiona. Virtakiskoston ja paalkkien etäisyys 80 mm sekä syöttövirran taajuus 50 Hz.

I (kA)	Suojaamaton puristuspaalkki		Suojattu puristuspaalkki		LDT-puristuspaalkki		
	T (°C)	ΔT_{aust} (°C)	T (°C)	ΔT_{cu} (°C)	T (°C)	ΔT_{LDT} (°C)	ΔT_{ymp} (°C)
3,0	33,1	11,0	26,9	4,8	30,0	7,9	22,1
5,0	46,3	23,9	33,2	10,8	39,5	17,1	22,4
7,0	69,6	46,4	46,8	23,6	56,7	33,5	23,2
9,0	96,0	72,0	63,2	39,2	76,6	52,6	24,0

Taulukko 19 Puristuspaalkkien lämpenemät paalkkien reunoilta syöttövirran funktiona. Virtakiskoston ja paalkkien etäisyys 80 mm sekä syöttövirran taajuus 50 Hz.

I (kA)	Suojaamaton puristuspaalkki		Suojattu puristuspaalkki		LDT-puristuspaalkki		
	T (°C)	ΔT_{aust} (°C)	T (°C)	ΔT_{cu} (°C)	T (°C)	ΔT_{LDT} (°C)	ΔT_{ymp} (°C)
3,0	27,4	5,3	25,8	3,7	30,0	7,9	22,1
5,0	33,4	11,0	30,2	7,8	39,2	16,8	22,4
7,0	46,1	22,9	40,4	17,2	55,3	32,1	23,2
9,0	59,7	35,7	52,5	28,5	74,2	50,2	24,0

4.2 Johtimien ja puristuspalkkien etäisyyden vaikutus palkkien lämpenemään

Virtakiskoston ja puristuspalkkien etäisyyden vaikutusta lämpenemään tutkittiin neljällä kokeella. Mittaukset tehtiin etäisyyksillä 80 mm – 200 mm.

Taulukko 20 Puristuspalkkien lämpenemät palkkien keskeltä virtakiskoston ja palkkien etäisyyden funktiona. Syöttövirta 7 kA ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

r (mm)	Suojaamaton puristus-palkki		Suojattu puristus-palkki		LDT-puristus-palkki		
	T (°C)	ΔT_{aust} (°C)	T (°C)	ΔT_{cu} (°C)	T (°C)	ΔT_{LDT} (°C)	ΔT_{ymp} (°C)
80	69,6	46,4	46,8	23,6	56,7	33,5	23,2
120	58,7	34,9	40,8	17,0	48,8	25,0	23,8
160	55,4	30,5	42,3	17,4	48,9	24,0	24,9
200	51,3	26,0	41,3	16,0	47,0	21,7	25,3

Taulukko 21 Puristuspalkkien lämpenemät palkkien reunoilta virtakiskoston ja palkkien etäisyyden funktiona. Syöttövirta 7 kA ja syöttövirran taajuus 50 Hz.

r (mm)	Suojaamaton puristus-palkki		Suojattu puristus-palkki		LDT-puristus-palkki		
	T (°C)	ΔT_{aust} (°C)	T (°C)	ΔT_{cu} (°C)	T (°C)	ΔT_{LDT} (°C)	ΔT_{ymp} (°C)
80	46,1	22,9	40,4	17,2	55,3	32,1	23,2
120	40,9	17,1	36,1	12,3	48,1	24,3	23,8
160	42,4	17,5	39,1	14,2	46,9	22,0	24,9
200	41,3	16,0	38,7	13,4	44,8	19,5	25,3

4.3 Syöttövirran taajuuden vaikutus puristuspalkkien lämpenemään

Syöttövirran taajuuden vaikutusta puristuspalkkien lämpenemään tutkittiin neljällä kokeella. Mittaukset tehtiin taajuuksilla 50 Hz – 250 Hz.

Taulukko 22 Puristuspalkkien lämpenemät palkkien keskeltä syöttövirran taajuuden funktiona. Syöttövirta 5 kA sekä virtakiskoston ja palkkien välinen etäisyys 80 mm.

f (Hz)	Suojaamaton puristus-palkki		Suojattu puristus-palkki		LDT-puristus-palkki		
	T (°C)	ΔT_{aust} (°C)	T (°C)	ΔT_{cu} (°C)	T (°C)	ΔT_{LDT} (°C)	ΔT_{ymp} (°C)
50	46,3	23,9	33,2	10,8	39,5	17,1	22,4
60	65,9	40,8	44,9	19,8	59,4	34,3	25,1
166	103,1	78,0	51,0	25,9	91,6	66,5	25,1
250	117,4	92,4	55,6	30,6	105,5	80,5	25,0

Taulukko 23 Puristuspalkkien lämpenemät palkkien reunoilta syöttövirran taajuuden funktiona. Syöttövirta 5 kA sekä virtakiskoston ja palkkien välinen etäisyys 80 mm.

f (Hz)	Suojaamaton puristus-palkki		Suojattu puristus-palkki		LDT-puristus-palkki		
	T (°C)	ΔT_{aust} (°C)	T (°C)	ΔT_{cu} (°C)	T (°C)	ΔT_{LDT} (°C)	ΔT_{ymp} (°C)
50	33,4	11,0	30,2	7,8	39,2	16,8	22,4
60	51,3	26,2	43,1	18,0	55,8	30,7	25,1
166	66,7	41,6	51,4	26,3	84,3	59,2	25,1
250	70,7	45,7	54,2	29,2	93,8	68,8	25,0

Liite 4 Yhtälöiden johtaminen

Kaikki testikappaleiden lämpenemiseen käytettävät kaavat voidaan johtaa samalla periaatteella. Yhtälöt ovat muotoa:

$$\Delta T = A \left(\frac{y}{p} \right)^x,$$

missä y on muuttuja (virta, etäisyys tai taajuus) ja p on muuttujan yksikön kumoava kerroin. A on muista muuttujista riippuva kerroin, johon esimerkiksi virran muuttuessa vaikuttavat myös etäisyys ja taajuus. Lämpenemän kasvunopeutta kuvaa eksponentti x .

Suojaamattoman teräslevyn lämpenemä virran funktiona kun virran syöttö on kolmivaiheinen:

$$\Delta T = A \left(\frac{I}{a} \right)^x, \text{ missä } a \text{ on } IA.$$

Lasketaan eksponentti x :

$$\Delta T_1 = A \left(\frac{I_1}{a} \right)^x$$

$$\Delta T_2 = A \left(\frac{I_2}{a} \right)^x$$

missä ΔT_1 on kuumimman alueen lämpenemä virralla I_1 ja ΔT_2 on kuumimman alueen lämpenemä virralla I_2 .

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \frac{A \left(\frac{I_1}{a} \right)^x}{A \left(\frac{I_2}{a} \right)^x}$$

Vakiot A ja a supistuvat pois, jolloin yhtälöksi saadaan:

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^x$$

EkspONENTTI x voidaan ratkaista logaritmin laskusäännön avulla:

$$\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = x \ln \frac{I_1}{I_2}$$

$$x = \frac{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}{\ln \frac{I_1}{I_2}}$$

Valitaan testituloksista $I_1=9000A$, $\Delta T_1=167,5^\circ C$ ja $I_2=3000A$, $\Delta T_2=29,1^\circ C$, jolloin

$$x = \frac{\ln \frac{167,5^\circ C}{29,1^\circ C}}{\ln \frac{9000A}{3000A}} \approx 1,593.$$

Määritetään kerroin A ($^\circ C$):

$$\Delta T = A \left(\frac{I}{a}\right)^{1,593}$$

$$A = \frac{\Delta T}{\left(\frac{I}{a}\right)^{1,593}}$$

Lasketaan mittaustuloksista jokaista virtaa vastaava kerroin A:

I (A)	A(°C)
3000	$8,41 \cdot 10^{-5}$
4900	$9,88 \cdot 10^{-5}$
7000	$8,99 \cdot 10^{-5}$
9000	$8,41 \cdot 10^{-5}$

Kerroin A saadaan, kun lasketaan virtoja vastaavista kertoimista keskiarvo:

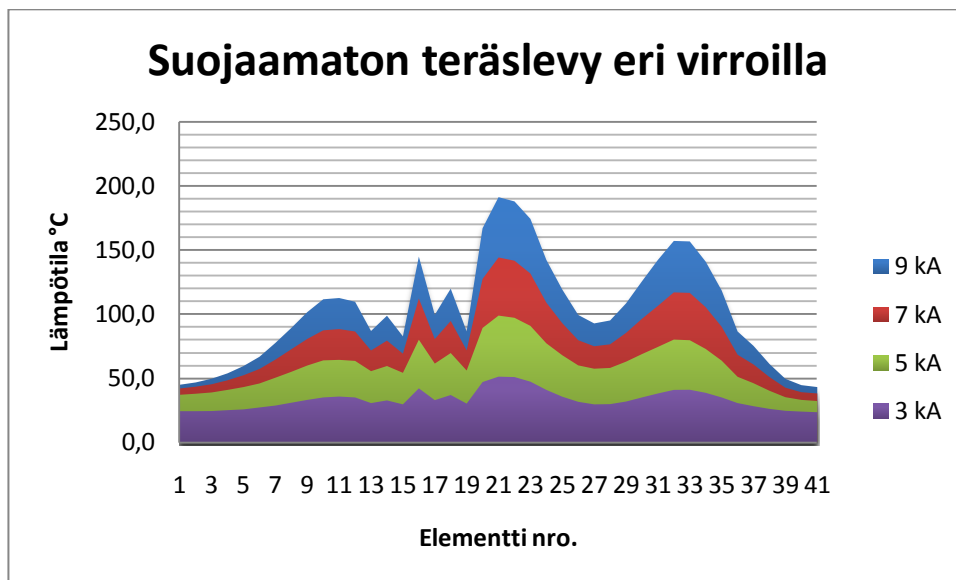
$$A \approx 8,923 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Suojaamattoman teräslevyn lämpenemä virran funktiona, kun taajuus on 50 Hz ja etäisyys on 80 mm:

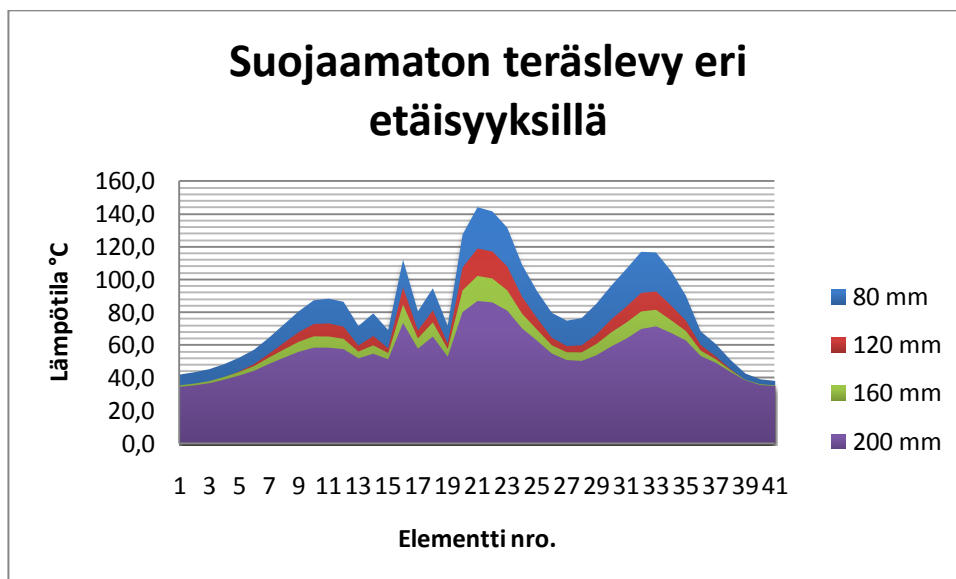
$$\Delta T = 8,923 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \left(\frac{I}{a} \right)^{1,593}$$

Liite 5 Lämpötilajakaumat

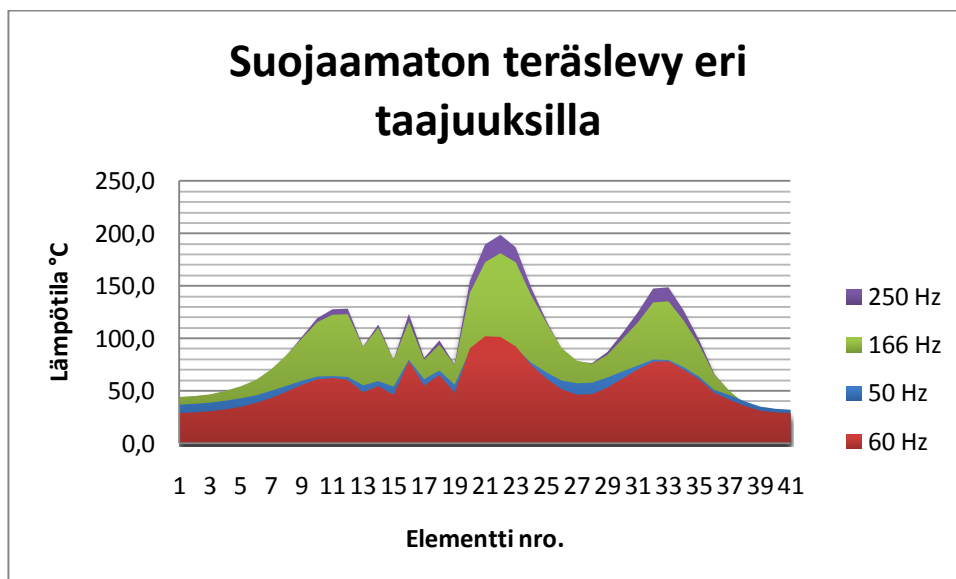
1. Suojaamaton epämagneettinen teräslevy



Kuva 41 Suojaamattoman austeniitti teräslevyn lämpöjakauma eri virroilla. 41 lämpötila-anturia levyn keskellä pystysuoraan.

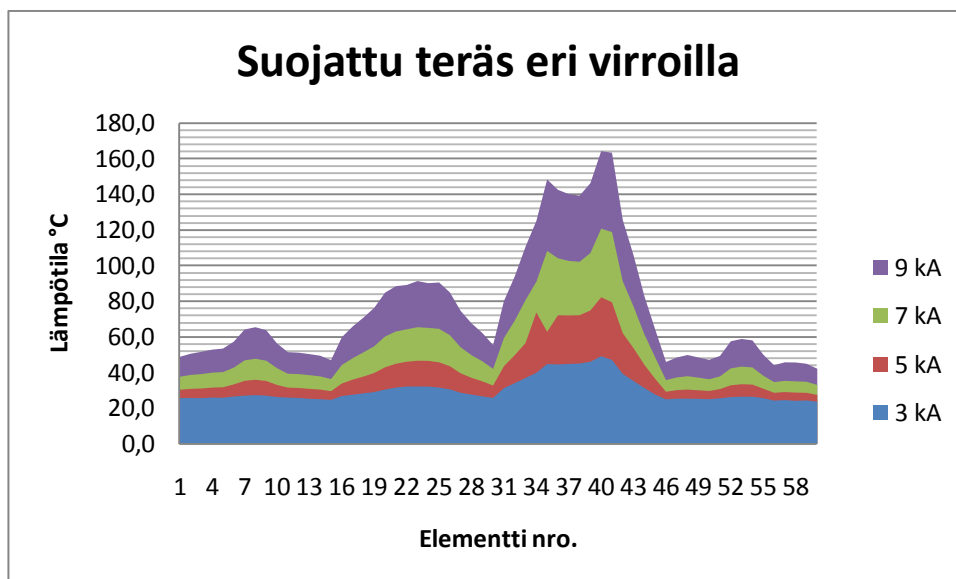


Kuva 42 Suojaamattoman austeniitti teräslevyn lämpöjakauma eri etäisyyksillä. 41 lämpötila-anturia levyn keskellä pystysuoraan.

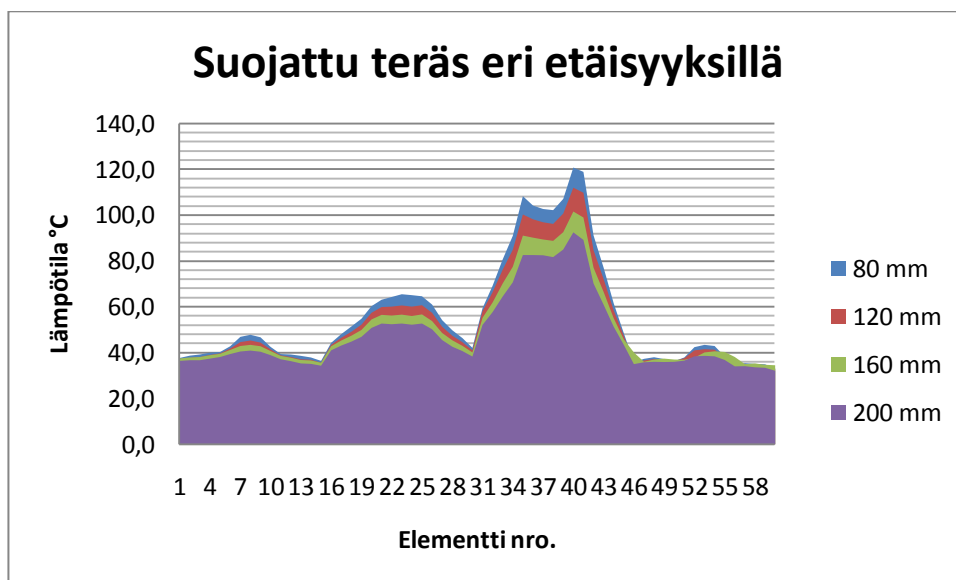


Kuva 43 Suojaamattoman austeniitti teräslevyn lämpöjakauma eri taajuuksilla. 41 lämpötilanturia levyn keskellä pystysuoraan.

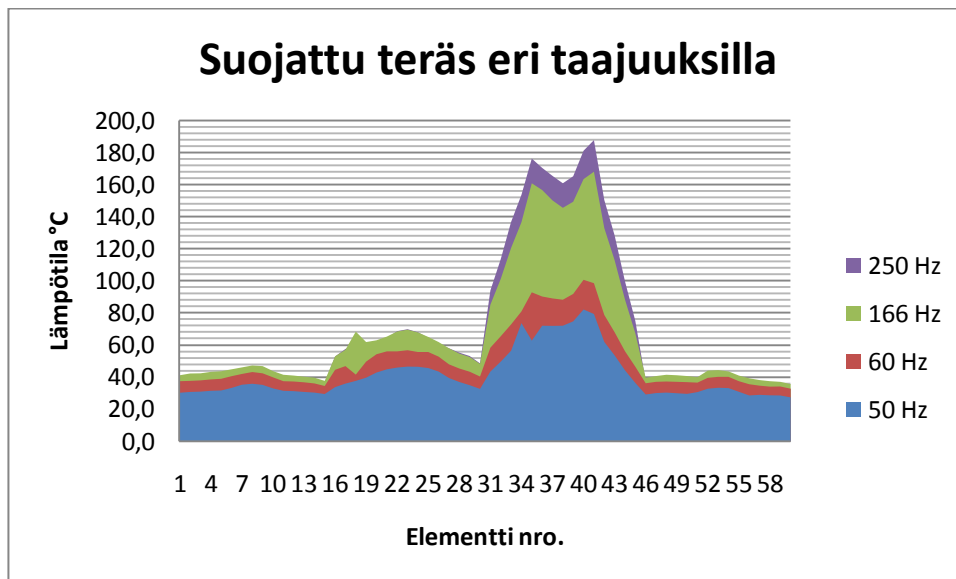
2. Kuparilla suojattu teräslevy



Kuva 44 Kuparilla suojatun austeniitti teräslevyn lämpöjakauma eri virroilla. Lämpötila-anturit 1-15 kuparisuojan keskellä, 16-30 kuparisuojan reunalla, 31-45 levyn suojaamattomassa osassa ja 46-60 kuparisuojan vastakkaisella puolella levyä.



Kuva 45 Kuparilla suojatun austeniitti teräslevyn lämpöjakauma eri etäisyyksillä. Lämpötila-anturit 1-15 kuparisuojan keskellä, 16-30 kuparisuojan reunalla, 31-45 levyn suojaamattomassa osassa ja 46-60 kuparisuojan vastakkaisella puolella levyä.



Kuva 46 Kuparilla suojatun austeniitti teräslevyn lämpöjakauma eri taajuuksilla. Lämpötila-anturit 1-15 kuparisuojan keskellä, 16-30 kuparisuojan reunalla, 31-45 levyn suojaamattomassa osassa ja 46-60 kuparisuojan vastakkaisella puolella levyä.