



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Mika Rautiainen

Tehomuuntajan teräsosien lämpötilojen simulointi suurvirtajohtimien läheisyydessä

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö
Sähkötekniikan diplomityö
Energia- ja informaatiotekniikka (DI)

Vaasa 2022

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

Tekijä:	Mika Rautiainen		
Tutkielman nimi:	Tehomuuntajan teräsosien lämpötilojen simulointi suurvirtajohtimien läheisyydessä		
Tutkinto:	Diplomi-insinööri		
Oppiaine:	Sähkötekniikka		
Työn valvoja:	Timo Vekara		
Työn ohjaaja:	Hasse Nordman		
Työn tarkastaja:	Otto Ellonen		
Valmistumisvuosi:	2022	Sivumäärä:	124

TIIVISTELMÄ:

Muuntajavalmistajat pyrkivät tekemään muuntajista entistä energia- ja materiaalitehokkaampia, mikä johtaa niiden koon pienenemiseen. Tämän seurauksena säiliö- ja tukirakenteisiin kohdistuu aiempaa voimakkaampia magneettivoita, jotka syntyvät käämien hajavuon ja suurvirtakiskostojen vaikutuksesta. Teräsrakenteisiin kohdistuva magneettivo aiheuttaa häviöitä ja korkeita lämpötiloja rakenteissa. Liian korkeiden lämpötilojen välttämiseksi tarvitaan tarkka ja luotettava menetelmä, jolla voidaan laskea paikalliset lämpötilat ennen muuntajan valmistusta. Suurvirtakiskoston monimutkaisesta geometriasta johtuen kolmiulotteinen simulointi on ainut riittävän tarkka menetelmä lämpötilojen laskemiseen. Simulointitulokset riippuvat kuitenkin paljon sekä mallinnustavasta että laskenta-asetuksista, joten niiden sopivuuden tarkistaminen on välttämätöntä. Vertaamalla simulointi- ja mittaustuloksia keskenään voidaan selvittää simulointitulosten luotettavuus.

Diplomityö on tehty Hitachi Energy Finland oy:n Transformers-yksikölle. Työn tarkoituksena on tutkia, kuinka luotettavasti käytössä ollut simulointimenetelmä laskee suurvirtaisten kiskojen aiheuttamat korkeat lämpötilat teräsrakenteissa. Tämän selvittämiseksi tässä työssä mallinnettiin ja simuloitiin aiemmin tehdyt lämpenemäkokeet, joissa oli tarkasteltu erikseen sähkövirran suuruuden, taajuuden ja kiskojen etäisyyden vaikutusta testikappaleiden lämpötiloihin. Testien suoritustapa eli vain yhden muuttujan kerrallaan muuttaminen tarjosi erinomaisen aineiston simulointitulosten luotettavuuden arvioimiseen. Lämpenemäkokeissa tutkittiin tapauksia, joissa virtakiskot olivat testikappaleiden pinnan suuntaisesti sekä tapauksia, joissa kiskot menivät testikappaleissa olevista aukoista läpi. Testikappaleina olivat suojaamattomat ja alumiinilla tai kuparilla suojatut magneettiset sekä epämagneettiset teräslevyt.

Työn tuloksena saatiin 35 lämpenemäkokeen simulointitulokset. Jokaisesta lämpenemäkokeesta tehtiin kuva, jossa yhdistettiin simulointi- ja mittaustulokset. Niiden perusteella simulointimenetelmä osoittautui hyvin tarkaksi useissa testeissä. Suurimmat poikkeamat syntyivät magneettista teräslevyä suojaavassa alumiinilevyssä sekä virtakiskojen mennessä magneettisen teräslevyn aukoista läpi. Lämpötilaerot johtuivat säteilyn vaikutuksen pois jättämisestä ja lineaarisesta permeabiliteetin määrittelystä. Näiden havaintojen perusteella voidaankin suositella säteilyn huomiointia ilmajäähdytteisissä osissa sekä magneettisen teräksen permeabiliteetin määrittelyä epälineaarisesti.

AVAINSANAT: Tehomuuntaja, suurvirtakiskosto, lämpeneminen

UNIVERSITY OF VAASA**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

Author: Mika Rautiainen
Title of the Thesis: Simulation of the temperature rise in steel components of power transformer in the vicinity of high-current leads
Degree: Master of Science
Major: Electrical Engineering
Supervisor: Timo Vekara
Instructor: Hasse Nordman
Evaluator: Otto Ellonen
Year: 2022 **Number of pages:** 124

ABSTRACT:

Power transformer manufacturers strive to make their transformers more energy efficient and decrease material use, which leads to a reduction in transformer size. Therefore, the tank and support structures are subjected to higher magnetic stray fluxes generated by the windings and high current leads. These increased magnetic fluxes in turn generate higher losses and temperatures. To avoid critical temperatures, an accurate and reliable routine is required to calculate localized losses and temperatures before the transformer design is released for production. The geometry of high-current leads is complex, which is why a 3D FEM simulation is the only sufficiently accurate method for temperature rise calculation. The simulation results, however, are rather dependent on the simulation approach and calculation settings. Therefore, a calculation routine that produces reliable results must be established and validated by comparing measured and calculated results.

This thesis was done for the Transformers factory of Hitachi Energy Finland oy. The goal of this work was to study how reliable the current simulation routine is for calculating temperature rises in steel structures due to losses generated by stray flux from high-current leads. The study was conducted by modeling and simulating earlier temperature rise tests that were performed to measure the effects of varying magnitudes of current, frequency and distances on temperature rises in test objects. Only one variable was changed at a time in the temperature rise tests, which resulted in an excellent collection of test results that could be used to validate the simulation results. Temperature rise tests were performed in cases where the leads were parallel to the surface of the test object and cases where the leads penetrated the test object perpendicularly. The test objects were magnetic and nonmagnetic steel plates that were shielded with aluminum, copper, or nothing at all.

As the results of this work, 35 temperature rise tests were simulated. For each temperature rise test a figure was drawn where simulation and measurement results were compared with each other. The simulation routine proved to be very accurate in many of the tests. The biggest discrepancies were found in the case with aluminum plate shielding the magnetic steel plate and in cases where the leads penetrated the magnetic steel plate. It was concluded that the deviations in temperature were caused by thermal radiation and the nonlinear material permeabilities. Based on these findings it is recommended that in modelling and simulation thermal radiation should be considered for air cooled parts as well as the nonlinear nature of the permeability of magnetic steel.

KEYWORDS: power transformer, high-current lead, temperature rise

Sisällys

1	Johdanto	18
2	Teräsosien lämpenemiseen vaikuttavat sähkömagneettiset ilmiöt	20
2.1	Maxwellin yhtälöt	21
2.1.1	Faradayn laki	21
2.1.2	Lenzin laki	21
2.1.3	Amperen laki	22
2.1.4	Gaussin laki	22
2.1.5	Gaussin magnetismilaki	22
2.2	Väliaine yhtälöt	23
2.3	Materiaalien magneettiset ominaisuudet	24
2.3.1	Permeabiliteettiin vaikuttavat tekijät	24
2.3.2	Hystereesi	26
2.3.3	Koersiivisyys	26
3	Teräsosien jäähtymiseen vaikuttavat termodynaamiset ilmiöt	28
3.1	Lämpötilan vaikutus muuntajaan	28
3.1.1	Johtuminen	28
3.1.2	Konvektio	29
3.1.3	Säteily	30
3.2	Lämmön siirtotapojen mallintaminen	32
4	Aiemmat tutkimukset	33
4.1	Aiemmin suoritettut mittaukset	33
4.2	Aiemmin suoritettut testit	34
5	Teräsosien mallinnus ja simulointi	38
5.1	Siemens Simcenter Magnet- ja Thermal- simulointiohjelmistot	38
5.2	Simulointitulosten luotettavuus	39
5.3	Sähkömagneettisten ilmiöiden simuloiminen	40
5.4	Mallinnusprosessi	40
5.4.1	Laskettavan alueen rajaaminen	41

5.4.2	Geometrian muodostaminen ja materiaalien määrittely	42
5.4.3	Lähteiden määrittely	44
5.4.4	Mallin parametointi	44
5.4.5	Verkotus- ja laskenta-asetukset	45
5.4.6	Mallin laskeminen	46
5.4.7	Tulosten arviointi	46
6	Lämpenemäkokeiden simulointi	47
6.1	Koejärjestelyn vaihevirrat	47
6.1.1	Vaihevirtojen vaihekulmat	48
6.1.2	Kiskoston virranjako	49
6.2	Simulointimalli	50
6.3	Testikappaleiden määrittelyt	52
6.3.1	Pintaimpedanssi	52
6.3.2	Verkotus	52
6.4	Simulointimallista puuttuvat ilmiöt ja ominaisuudet	53
6.5	Tuloksen tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä	55
7	Simulointitulokset	56
7.1	Suojaamaton magneettinen teräslevy	56
7.1.1	Virran suuruuden vaikutus magneettisen teräslevyn lämpötiloihin	57
7.1.2	Virran etäisyyden vaikutus magneettisen teräslevyn lämpötiloihin	57
7.1.3	Taajuuden vaikutus magneettisen teräslevyn lämpötiloihin	58
7.2	Alumiinilla suojattu magneettinen teräslevy	59
7.2.1	Virran suuruuden vaikutus lämpötiloihin alumiinisuojaalla	60
7.2.2	Virran etäisyyden vaikutus lämpötiloihin alumiinisuojaalla	61
7.2.3	Taajuuden vaikutus lämpötiloihin alumiinisuojaalla	63
7.3	Kuparilla suojattu magneettinen teräslevy	65
7.3.1	Virran suuruuden vaikutus lämpötiloihin kuparisuojaalla	66
7.3.2	Virran etäisyyden vaikutus lämpötiloihin kuparisuojaalla	67
7.3.3	Taajuuden vaikutus lämpötiloihin kuparisuojaalla	69
7.4	Vaihe-etäisyyden vaikutus lämpötiloihin	71

7.5	Virtojen kompensoinnin vaikutus lämpötiloihin	73
7.5.1	Magneettinen teräslevy kompensoituilla virroilla	73
7.5.2	Alumiinilla suojattu magneettinen teräslevy kompensoituilla virroilla	74
7.5.3	Kuparilla suojattu magneettinen teräslevy kompensoituilla virroilla	76
7.6	Magneettisen teräslevyn pienet suorakaiteenmuotoiset läpivientiaukot	78
7.6.1	Virran suuruuden vaikutus lämpötiloihin pienillä aukoilla	78
7.6.2	Virran taajuuden vaikutus lämpötiloihin pienillä aukoilla	79
7.6.3	Kompensoinnin vaikutus lämpötiloihin pienillä aukoilla	81
7.7	Magneettisen teräslevyn suuret suorakaiteenmuotoiset läpivientiaukot	82
7.7.1	Virran suuruuden vaikutus lämpötiloihin suurilla aukoilla	82
7.7.2	Kompensoinnin vaikutus lämpötiloihin suurilla aukoilla	83
7.8	Läpivientikiskojen vaikutus lämpötiloihin epämagneettisessa teräksessä	85
7.8.1	Läpivientikiskojen virran suuruuden vaikutus lämpötiloihin	85
7.8.2	Läpivientikiskojen taajuuden vaikutus lämpötiloihin	86
7.9	Magneettisen teräslevyn läpivientiaukon halkaisijan vaikutus	88
7.9.1	300 mm läpivientiaukkojen lämpötilat eri virroilla	88
7.9.2	300 mm läpivientiaukkojen lämpötilat eri taajuuksilla	89
7.9.3	500 mm läpivientiaukkojen lämpötilat eri virroilla	90
7.9.4	500 mm läpivientiaukkojen lämpötilat eri taajuuksilla	92
7.9.5	700 mm läpivientiaukkojen lämpötilat eri virroilla	93
7.9.6	700 mm läpivientiaukkojen lämpötilat eri taajuuksilla	95
7.10	Suojaamaton epämagneettinen teräslevy	96
7.10.1	Virran vaikutus epämagneettisen teräslevyn lämpötiloihin	96
7.10.2	Etäisyyden vaikutus epämagneettisen teräslevyn lämpötiloihin	97
7.10.3	Taajuuden vaikutus epämagneettisen teräslevyn lämpötiloihin	98
7.11	Kuparilla suojattu epämagneettinen teräslevy	98
7.11.1	Virran vaikutus lämpötiloihin kuparisuojalla	98
7.11.2	Etäisyyden vaikutus lämpötiloihin kuparisuojalla	100
7.11.3	Taajuuden vaikutus lämpötiloihin kuparisuojalla	101

8	Pohdinta ja johtopäätökset	103
	8.1 Mahdollisia lämpötilaerojen aiheuttajia	105
	8.2 Vaihevälien lämpenemä	106
	8.3 Jatkokehitys	106
9	Yhteenveto	108
	Lähteet	110
	Liitteet	112
	Liite 1. Virtakiskojen ja testikappaleiden kuvat.	112
	Liite 2. Simuloinnissa käytettyjen materiaalien ominaisuudet.	123

Kuvat

Kuva 1.	Erään kidesuunnatun sydänlevyn B-H-käyrä.	25
Kuva 2.	Ferromagneettisen materiaalin magnetoimiskäyrä (Viljanen 2007:90).	26
Kuva 3.	Säteilyn ja konvektion keskinäinen vertailu vaaka- ja pystypinnoilla, jotka ovat ilmassa ja öljyssä.	31
Kuva 4.	Mittausjärjestelyn testikappale, lämpötila-anturit, virtakaapelit ja -kiskot sekä syöttömuuntaja.	34
Kuva 5.	Mallinnusprosessin vaiheet (ABB 2008:29).	41
Kuva 6.	Esimerkit symmetrisistä tilanteista tangentiaalinen kenttä (a) ja normaalin suuntainen kenttä (b) (ABB 2008:20).	42
Kuva 7.	Materiaalin ominaisuuksien valintaikkuna.	43
Kuva 8.	Laskenta-asetusikkuna.	45
Kuva 9.	Vaihevirtojen itsearvot ja kulmat vektorikaaviona.	49
Kuva 10.	Laskettu virranjakauma vaakakiskostossa.	50
Kuva 11.	Simulointimalli.	51
Kuva 12.	Konvektion määrittelyikkuna.	55
Kuva 13.	Suojaamattoman levyn värinmuutos (a) sekä simuloitu lämmönjakauma (b).	56
Kuva 14.	Testi 1: Suojaamattoman teräslevyn elementeillä 1–39 mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 3; 5,1; 7,1 ja 8,7 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.	57
Kuva 15.	Testi 2: Suojaamattoman teräslevyn elementeillä 1–39 mitatut ja lasketut lämpötilat 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun keskimmäisen vaiheen virta on 7 kA ja taajuus on 50 Hz.	58
Kuva 16.	Testi 3: Suojaamattoman teräslevyn elementeillä 1–39 mitatut ja lasketut lämpötilat 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun keskimmäisen vaiheen virta on 5 kA ja etäisyys on 80 mm.	59
Kuva 17.	Testi 4: Alumiinisuojan keskeltä elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 5; 7 ja 8,7 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.	60

- Kuva 18. Testi 4: Alumiinilla suojan reunasta elementeillä 31–45 mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 5; 7 ja 8,7 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz. 61
- Kuva 19. Testi 4: Suojaamattomasta osasta elementeillä 1–15 mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 5; 7 ja 8,7 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz. 61
- Kuva 20. Testi 5: Alumiinisuojan keskeltä elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun keskimmäisen vaiheen virta on 7 kA ja taajuus on 50 Hz. 62
- Kuva 21. Testi 5: Alumiinisuojan reunasta elementeillä 31–45 mitatut ja lasketut lämpötilat 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun keskimmäisen vaiheen virta on 7 kA ja taajuus on 50 Hz. 62
- Kuva 22. Testi 5: Suojaamattomasta osasta elementeillä 1–15 mitatut ja lasketut lämpötilat 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun keskimmäisen vaiheen virta on 7 kA ja taajuus on 50 Hz. 63
- Kuva 23. Testi 6: Alumiinisuojan keskeltä elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun keskimmäisen vaiheen virta on 5 kA ja etäisyys on 80 mm. 64
- Kuva 24. Testi 6: Alumiinisuojan reunasta elementeillä 31–45 mitatut ja lasketut lämpötilat 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun keskimmäisen vaiheen virta on 5 kA ja etäisyys on 80 mm. 64
- Kuva 25. Testi 6: Suojaamattomasta osasta elementeillä 1–15 mitatut ja lasketut lämpötilat 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun keskimmäisen vaiheen virta on 5 kA ja etäisyys on 80 mm. 65
- Kuva 26. Testi 7: Kuparisuojan keskeltä elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 3; 5,1; 7,1 ja 8,7 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz. 66
- Kuva 27. Testi 7: Kuparisuojan reunasta elementeillä 31–45 mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 3; 5,1; 7,1 ja 8,7 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz. 67

- Kuva 28. Testi 7: Suojaamattomasta osasta elementeillä 1–15 mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 3; 5,1; 7,1 ja 8,7 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz. 67
- Kuva 29. Testi 8: Kuparisuojan keskeltä elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun keskimmäisen vaiheen virta on 7 kA ja taajuus on 50 Hz. 68
- Kuva 30. Testi 8: Kuparisuojan reunasta elementeillä 31–45 mitatut ja lasketut lämpötilat 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun keskimmäisen vaiheen virta on 7 kA ja taajuus on 50 Hz. 68
- Kuva 31. Testi 8: Suojaamattomasta osasta elementeillä 1–15 mitatut ja lasketut lämpötilat 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun keskimmäisen vaiheen virta on 7 kA ja taajuus on 50 Hz. 69
- Kuva 32. Testi 9: Kuparisuojan keskeltä elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun keskimmäisen vaiheen virta on 5 kA ja etäisyys on 80 mm. 70
- Kuva 33. Testi 9: Kuparisuojan reunasta elementeillä 31–45 mitatut ja lasketut lämpötilat 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun keskimmäisen vaiheen virta on 5 kA ja etäisyys on 80 mm. 70
- Kuva 34. Testi 9: Suojaamattomasta osasta elementeillä 1–15 mitatut ja lasketut lämpötilat 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun keskimmäisen vaiheen virta on 5 kA ja etäisyys on 80 mm. 71
- Kuva 35. Testi 10: Magneettisen teräslevyn keskeltä elementeillä 1–39 mitatut ja lasketut lämpötilat 5 ja 9 kA virroilla, kun testikappaleen etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz. 72
- Kuva 36. Testit 11 ja 12: Magneettisen teräslevyn keskeltä elementeillä 1–39 mitatut ja lasketut lämpötilat 80, 120 ja 160 mm etäisyyksillä, kun taajuus on 50 Hz. 72
- Kuva 37. Testi 13: Magneettisen teräslevyn keskeltä elementeillä 1–39 mitatut ja lasketut lämpötilat kolmivaiheisella kiskostolla vastakkaisilla 4,2 kA vaihevirralla 80 ja 120 mm etäisyydellä, kun taajuus on 50 Hz. 74

- Kuva 38. Testi 14: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–39 mitatut ja lasketut lämpötilat kaksivaiheisella kytkennällä 4,2 kA virralla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz. 74
- Kuva 39. Testi 15: Alumiinisuojan keskeltä elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat vastakkaisilla 4,2 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz. 75
- Kuva 40. Testi 15: Alumiinisuojan reunasta elementeillä 31–45 mitatut ja lasketut lämpötilat vastakkaisilla 4,2 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz. 75
- Kuva 41. Testi 15: Suojaamattomasta osasta elementeillä 1–15 mitatut ja lasketut lämpötilat vastakkaisilla 4,2 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz. 76
- Kuva 42. Testi 16: Kuparisuojan keskeltä elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat vastakkaisilla 4,2 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz. 77
- Kuva 43. Testi 16: Kuparisuojan reunasta elementeillä 31–45 mitatut ja lasketut lämpötilat vastakkaisilla 4,2 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz. 77
- Kuva 44. Testi 16: Suojaamattomasta osasta elementeillä 1–15 mitatut ja lasketut lämpötilat vastakkaisilla 4,2 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz. 78
- Kuva 45. Testi 17: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–36 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5, 6 ja 7 kA virroilla virtakiskojen mennessä läpi pienistä suorakaideaukoista, kun taajuus on 50 Hz. 79
- Kuva 46. Testi 17: Magneettisen teräslevyn elementeillä 37–46 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5, 6 ja 7 kA virroilla virtakiskojen mennessä läpi pienistä suorakaideaukoista, kun taajuus on 50 Hz. 79
- Kuva 47. Testi 18: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–36 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 50, 60, 166 ja 250 Hz taajuisten

- virtakiskojen mennessä läpi pienistä suorakaideaukoista, kun virta on 5 kA. 80
- Kuva 48. Testi 18: Magneettisen teräslevyn elementeillä 37–46 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 50, 60, 166 ja 250 Hz taajuisten virtakiskojen mennessä läpi pienistä suorakaideaukoista, kun virta on 5 kA. 80
- Kuva 49. Testi 19: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–36 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat kompensoiduilla 4,2 kA virroilla, kun virtakiskot menevät läpi pienistä suorakaideaukoista. 81
- Kuva 50. Testi 19: Magneettisen teräslevyn elementeillä 37–46 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat kompensoiduilla 4,2 kA virroilla, kun virtakiskot menevät läpi pienistä suorakaideaukoista. 82
- Kuva 51. Testi 20: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–32 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5, 6 ja 7 kA virroilla virtakiskojen mennessä läpi suurista suorakaideaukoista, kun taajuus on 50 Hz. 83
- Kuva 52. Testi 20: Magneettisen teräslevyn elementeillä 33–45 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5, 6 ja 7 kA virroilla virtakiskojen mennessä läpi suurista suorakaideaukoista, kun taajuus on 50 Hz. 83
- Kuva 53. Testi 21: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–32 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat kompensoiduilla 4,2 kA virroilla, kun virtakiskot menevät läpi suurista suorakaideaukoista. 84
- Kuva 54. Testi 21: Magneettisen teräslevyn elementeillä 33–45 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat kompensoiduilla 4,2 kA virroilla, kun virtakiskot menevät läpi suurista suorakaideaukoista. 84
- Kuva 55. Testi 22: Magneettisen teräslevyn reunassa elementeillä 4–41 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5, 6 ja 7 kA virroilla, kun virtakiskot menevät läpi epämagneettisesta läpivientialueesta. 86
- Kuva 56. Testi 22: Magneettisen teräslevyn elementeillä 42–46 vaakariviltä ja 100 mm palan elementeillä 1–3 mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5, 6 ja

- 7 kA virroilla, kun virtakiskot menevät läpi epämagneettisesta läpivientialueesta. 86
- Kuva 57. Testi 23: Magneettisen teräslevyn reunan elementeillä 4–41 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun virtakiskot menevät läpi epämagneettisesta läpivientialueesta. 87
- Kuva 58. Testi 23: Magneettisen teräslevyn elementeillä 42–46 vaakariviltä ja 100 mm palan elementeillä 1–3 mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun virtakiskot menevät läpi epämagneettisesta läpivientialueesta. 87
- Kuva 59. Testi 24: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–38 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5, 6 ja 7 kA virroilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 300 mm ja taajuus on 50 Hz. 88
- Kuva 60. Testi 24: Magneettisen teräslevyn elementeillä 39–46 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5, 6 ja 7 kA virroilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 300 mm ja taajuus on 50 Hz. 89
- Kuva 61. Testi 25: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–38 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 300 mm. 90
- Kuva 62. Testi 25: Magneettisen teräslevyn elementeillä 39–46 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 300 mm. 90
- Kuva 63. Testi 26: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–32 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5.1, 6 ja 7.1 kA virroilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 500 mm ja taajuus on 50 Hz. 91
- Kuva 64. Testi 26: Magneettisen teräslevyn elementeillä 34–46 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5.1, 6 ja 7.1 kA virroilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 500 mm ja taajuus on 50 Hz. 91

- Kuva 65. Testi 27: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–33 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 500 mm. 92
- Kuva 66. Testi 27: Magneettisen teräslevyn elementeillä 34–46 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 500 mm. 93
- Kuva 67. Testi 28: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–27 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5.1, 6 ja 7.1 kA virroilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 700 mm ja taajuus on 50 Hz. 94
- Kuva 68. Testi 28: Magneettisen teräslevyn elementeillä 28–41 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5.1, 6 ja 7.1 kA virroilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 700 mm ja taajuus on 50 Hz. 94
- Kuva 69. Testi 29: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–27 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 700 mm. 95
- Kuva 70. Testi 29: Magneettisen teräslevyn elementeillä 28–41 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 700 mm. 96
- Kuva 71. Testi D1: Epämagneettisen teräslevyn elementeillä 1–41 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 3, 5, 7 ja 9 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz. 97
- Kuva 72. Testi D2: Epämagneettisen teräslevyn elementeillä 1–41 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 7 kA virralla 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun taajuus on 50 Hz. 97
- Kuva 73. Testi D3: Epämagneettisen teräslevyn elementeillä 1–41 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun etäisyys on 80 mm. 98
- Kuva 74. Testi D4: Kuparisuojan keskeltä elementeillä 1–15 ja kuparisuojan reunasta elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat

	keskimmäisen vaiheen 3, 5, 7 ja 9 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.	99
Kuva 75.	Testi D4: Epämagneettisen teräslevyn suojaamattoman osan keskeltä elementeillä 31–45 ja kuparisuojan takaa elementeillä 46–60 mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 3, 5, 7 ja 9 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.	99
Kuva 76.	Testi D5: Kuparisuojan keskeltä elementeillä 1–15 ja kuparinsuojan reunasta elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat 7 kA virralla 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun taajuus on 50 Hz.	100
Kuva 77.	Testi D5: Epämagneettisen teräslevyn suojaamattoman osan keskeltä elementeillä 31–45 ja kuparisuojan takaa elementeillä 46–60 mitatut ja lasketut lämpötilat 7 kA virralla 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun taajuus on 50 Hz.	101
Kuva 78.	Testi D6: Kuparisuojan keskeltä elementeillä 1–15 ja kuparisuojan reunasta elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun etäisyys on 80 mm.	102
Kuva 79.	Testi D6: Epämagneettisen teräslevyn suojaamattoman osan keskeltä elementeillä 31–45 ja kuparisuojan takaa elementeillä 46–60 mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun etäisyys on 80 mm.	102
Kuva 80.	Virtakiskot.	112
Kuva 81.	Testikappale 1.	113
Kuva 82.	Testikappale 2.	114
Kuva 83.	Testikappale 3.	115
Kuva 84.	Testikappale 4.	116
Kuva 85.	Testikappale 5.	117
Kuva 86.	Testikappale 6.	118
Kuva 87.	Testikappale 7.	119
Kuva 88.	Testikappale 8.	120
Kuva 89.	Testikappale 9.	121

Kuva 90. Testikappale D1.	122
Kuva 91. Testikappale D2.	122

Taulukot

Taulukko 1. Suositeltavat konventiokertoimet (ABB 2008: 32)	30
Taulukko 2. Pintojen emissiokertoimia lämpösäteilyn alueella (Mikron 2–9).	32
Taulukko 3. Vuonna 2010 suoritettut lämpenemäkoheet.	36
Taulukko 4. Vuonna 2015 suoritettut lämpenemäkoheet.	37
Taulukko 5. Mittauksessa 4 mitatut kiskoston virrat.	48
Taulukko 6. Vaihekiskojen sähkövirrat ja niiden vaihekulmat.	49
Taulukko 7. Simulointimallin verkotuksen koko.	53
Taulukko 8. Kuparin tunkeutumissyvyys 50, 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla.	104
Taulukko 9. Materiaalien ominaisuudet.	123
Taulukko 10. Ilman dynaaminen viskositeetti.	124

Kreikkalaiset symbolit

ε	Permittiivisyys
μ	Permeabiliteetti
ρ	Varaustiheys
σ	Stefan-Boltzmann vakio

Muut symbolit

A	Pinta-ala
B	Magneettivuon tiheys
D	Sähkövuon tiheys
e	Emissiokerroin
E	Sähkökentän voimakkuus
H	Magneettikentän voimakkuus
H	Säteilyvirta

<i>J</i>	Virrantiheys
<i>k</i>	Lämmönjohtavuus
<i>L</i>	Levyn paksuus
<i>q</i>	Lämpövirta
<i>r</i>	Säde
<i>t</i>	Aika
<i>T</i>	Lämpötila

Lyhenteet

2D	Kaksiulotteinen (Two-dimensional)
3D	Kolmiulotteinen (Three-dimensional)
ABB	Asea Brown Boveri
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu (Computer-Aided Design)
IEC	Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio (International electrotechnical commission)
LDT	Suuri jakelumuuntaja (Large Distribution Transformer)

1 Johdanto

Globaalisti pyritään pienentämään päästöjä ja hillitsemään energiankulutusta. Myös tehomuuntajavalmistajat pyrkivät parantamaan energia- ja materiaalitehokkuutta tekeillä muuntajista yhä pienempiä. Koon pienentyessä säiliö- ja tukirakenteisiin kohdistuu voimakkaampia magneettivoita, jotka aiheuttavat niihin suurempia häviöitä. Liian korkeiden lämpötilojen välttämiseksi tarvitaan tarkka ja luotettava menetelmä muuntajarakenteiden lämpötilojen laskemiseksi.

Muuntajan käämeissä syntyvän hajavuon vaikutuksen laskeminen onnistuu muuntajan suunnitteluohjelmilla. Sen sijaan suurivirtaisten kiskostojen hajavuon aiheuttama lämpötilan nousu riippuu voimakkaasti vaihtelevasta geometriasta sekä käytetyistä materiaaleista niin, että kolmiulotteinen simulointi on ainoa mahdollinen menetelmä määrittää lämpötiloja ennen muuntajan valmistusta. Toisaalta simulointitulosten luotettavuus riippuu paljon mallinnustavasta sekä parametrien määrittelystä. Tämän vuoksi simuloijan täytyy tietää sopivat asetukset jokaisessa tilanteessa. Parantaakseni simulointitulosten luotettavuutta mallinnan ja simuloin elementtimenetelmällä aikaisemmin suoritettuja koejärjestelyjä ja mittauksia virtakiskojen hajakentän vaikutuksista lähellä oleviin metallikappaleisiin.

Aikaisemmin suoritettuja tutkimuksia antavat tietoa ja ymmärrystä ilmiöistä, mutta niiden tuloksia on kuitenkin hankala käyttää sellaisenaan rakenteiden mitoituksessa ja suunnittelussa. Käytännön tilanteet ovat lähes aina monimutkaisia ja poikkeavat koejärjestelyistä. Niiden tuloksia voidaan kuitenkin käyttää simulointiohjelman asetusten ja materiaalien määrittämiseen niin, että saatavat tulokset vastaavat paremmin mittaustuloksia. Tämän työn tutkimuskysymyksenä onkin:

- Antaako käytetty simulointirutiini luotettavia tuloksia lämpenemäkoekoiden testeissä?
- Millaisissa tilanteissa simulointi antaa liian suuria tai pieniä lämpötiloja?

- Miten simuloinnilla saatujen lämpötilojen tarkkuutta voidaan parantaa?

Näihin kysymyksiin vastaamiseksi simuloidaan aiemmin tehdyt lämpenemäkoeket ja verrataan simulointi- ja mittaustuloksia toisiinsa. Tässä työssä käytetään pohjana aikaisemmin tehtyjen opinnäyte- ja diplomitöiden yhteydessä saatuja mittaustuloksia. Ne soveltuvat hyvin simulointiparametrien arviointiin, koska niiden koejärjestelyt oli suunniteltu niin, että tuloksissa pystyttiin erottamaan eri ilmiöiden vaikutukset toisistaan mahdollisimman tarkasti. Samasta koejärjestelystä suoritettiin useita mittauksia mainiosti yhtä muuttujaa kerrallaan muuttamalla. Koejärjestelyjen mittauksissa muuttujina olivat sähkövirran suuruus, taajuus, etäisyys sekä testikappaleet. Näin voitiin selvittää myös kunkin muuttujan vaikutus lämpötiloihin.

2 Teräsosien lämpenemiseen vaikuttavat sähkömagneettiset ilmiöt

Muuntajavalmistajat pyrkivät tekemään kilpailukykyisiä muuntajia mahdollisimman kustannustehokkaasti. Muuntajan valmistuskustannuksista merkittävä osa syntyy siihen käytettävistä materiaaleista. Nykyisten energiatehokkuusvaatimusten myötä huonompien ja hinnaltaan alhaisempien materiaalien käyttäminen ei ole useinkaan mahdollista. Parhaimpia tapoja säästää valmistuskustannuksissa on tehdä muuntajista pienempiä. Koon pienentäminen johtaa kuitenkin useisiin haasteisiin. Yksi hankalasti hallittava ilmiö on suurivirtaisten johtimien aiheuttamien peilikuva- ja kiertovirtojen aiheuttamat häviöt muuntajan teräsosissa. Mitä lähempänä kompensoimattomat virtajohtimet ovat johtavista materiaaleista, sitä suurempi on niiden vaikutus lähellä olevaan materiaaliin. Varsinkin huonosti johtavien teräsosien lähellä olevat virtakiskot aiheuttavat häviöitä, joiden seurauksena syntyy paikallisia kuumia kohtia muuntajan säiliö- ja tukiranteisiin. Toisaalta suurin osa muuntajan teräsosista on öljyjäähdytteisiä, jolloin ne jäähtyvät varsin tehokkaasti.

Hyvästä jäähdytyksestä huolimatta paikalliset häviökeskittymät täytyy ottaa huomioon suunnittelussa. Liian kuumat pintalämpötilat aiheuttavat vauriota maalipintoihin, tiivisteisiin ja lähellä oleviin materiaaleihin (IEC 61378-3 2015: 46). Korkea lämpötila aiheuttaa myös kaasuuntumista, joka voidaan havaita muuntajan öljyanalyysillä ennen kuin muuntajan muut suojalaitteet toimivat. Tavallisesti korkeimpia lämpötiloja havaitaan muuntajan läpivientien ympärillä tai niiden lähellä olevissa ilmajäähdytteisissä osissa. Lämpenemää aiheuttavien virtojen vaikutus voidaan teoriassa ratkaista sähkömagneettisen kenttäteorian avulla, mutta käytännössä muuntajan monimutkaisesta geometriasta johtuen laskeminen pelkän kenttäteorian avulla on mahdotonta. Tässä luvussa käydään läpi simuloinnissa tarvittavat materiaalien ominaisuudet ja yhtälöt, joiden tarkasteleminen auttaa ymmärtämään sähkö- ja magneettikenttien käyttäytymistä.

2.1 Maxwellin yhtälöt

Teoriassa kaikki sähköä aiheuttamat ilmiöt voidaan kuvata sähkömagneettisen kenttäteorian avulla. Keskeisenä osana tässä kenttälaskennassa on James Clerk Maxwellin (1831–1879) yhdistelemät kenttäteorian yhtälöt. Tavallisesti Maxwellin yhtälöt esitetään neljän yhtälön muodossa. Maxwellillä ei ollut nykyistä vektoriesitystapaa käytössään vaan hän käytti eräänlaisia neliulotteisia kompleksilukuja ja skalaarikomponentteja (Sihvola & Lindell 2013:8).

2.1.1 Faradayn laki

Faradayn lain avulla voidaan kuvata muuttuvan magneettikentän indusoimaa virtaa johdinsilmukkaan. Magneettikentän muutoksen ja sähkökentän pyörteisyyden välillä vallitsee yhteys

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t), \quad (1)$$

missä \mathbf{E} on sähkökentän voimakkuus ja \mathbf{B} on magneettivuon tiheys.

Pyörteiseen sähkökenttään asetettuun johdinsilmukkaan indusoituu jännite. Silmukan ollessa suljettu, siinä kulkee Ohmin lain mukainen virta. Tähän ilmiöön perustuvat sähkön tuotannossa käytettävät generaattorit (Sihvola & Lindell 2013:8).

2.1.2 Lenzin laki

Faradayn laista poiketen Lenzin laki määrittää johdinsilmukkaan kohdistuvan sähkömotorisen voiman. Piirissä kulkevan virran suuruus määräytyy piirin resistanssin mukaan. Syntyvän virran suunta voidaan selvittää oikean käden säännön avulla. Periaatteena on, että silmukassa kiertävä virta pyrkii vastustamaan magneettivuon muutosta. (Sihvola & Lindell 2013:9).

2.1.3 Amperen laki

Sähkö- ja magneettikenttä saadaan sidottua toisiinsa Amperen lain mukaan, johon Maxwell lisäsi sähkövuon aikaderivaatan

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{J}(\mathbf{r}, t), \quad (2)$$

missä \mathbf{H} on magneettikentän voimakkuus, \mathbf{D} on sähkövuon tiheys ja \mathbf{J} on virrantiheys.

Yhtälö osoittaa, että magneettikentän pyörteisiin vaikuttaa sähkövirran lisäksi myös sähkökenttä. Tällä tavoin näemme, että sähkö- ja magneettikenttä vaikuttavat toisiinsa. Toisen muutos vaikuttaa myös toiseen (Sihvola & Lindell 2013:38). Sähkökoneiden toiminta perustuu magneettikenttään. Pyörivä sähkökone voitaisiin rakentaa toimimaan sähkökentän vaikutuksesta, mutta sen tuottama momentti olisi olematon (Verkkonen 2005: 13).

2.1.4 Gaussin laki

Gaussin lain avulla voidaan selvittää suljetun pinnan sisällä olevan varauksen suuruus

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \rho(\mathbf{r}, t), \quad (3)$$

missä \mathbf{D} on sähkövuontiheys ja ρ on varaustiheys.

2.1.5 Gaussin magnetismlaki

Vastaavasti laskemalla magneettikentän divergenssi minkä tahansa suljetun pinnan läpi tulos on aina nolla. Tämä on seurausta magneettikentän luonteesta. Magneettikentän vuo muodostaa suljetun silmukan. Magneettisia monopoleja ei ole havaittu olevan olemassa. Gaussin magnetismlaki kirjoitetaan muotoon

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0, \quad (4)$$

missä \mathbf{B} on magneettikentän vuontiheys.

2.2 Väliaine yhtälöt

Edellä mainittujen Maxwellin yhtälöiden lisäksi ymmärtääksemme kenttien käyttäytymistä materiaalissa tarvitaan kahta seuraavaa väliaine yhtälöä, joiden avulla määritetään vuontiheyden suhde kentänvoimakkuuteen

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (5)$$

missä \mathbf{B} on magneettikentän vuontiheys, μ on permeabiliteetti ja \mathbf{H} on magneettikentän voimakkuus ja

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad (6)$$

missä \mathbf{D} on sähkökentän vuontiheys, ε on permittiivisyys ja \mathbf{E} on sähkökentän voimakkuus.

Permeabiliteetti μ muodostuu kullekin materiaalille ominaisesta materiaalin suhteellisesta permeabiliteetistä μ_r ja tyhjiön permeabiliteetistä μ_0 seuraavasti

$$\mu = \mu_r \mu_0. \quad (7)$$

Vastaavasti permittiivisyys ε muodostuu kullekin materiaalille ominaisesta materiaalin suhteellisesta permittiivisyydestä ε_r ja tyhjiön permittiivisyydestä ε_0 seuraavasti (Edminister & Nahvi-Dekhordi 2011: 4, 175).

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0. \quad (8)$$

Edellä mainitut suhteellinen permeabiliteetti ja permittiivisyys eivät ole vakioita, vaan ne riippuvat suunnasta ja lämpötilasta. Useilla teräksillä ja raudoilla permeabiliteetti riippuu magneettikentän voimakkuudesta, jolloin sanotaan sen olevan epälineaarinen. Ferromagneettisilla materiaaleilla permeabiliteetti riippuu myös edeltävästä tilanteesta. Lisäksi permittiivisyys riippuu värähtelyn taajuudesta. (Sihvola & Lindell 2013:176–178). Magneettikentän kannalta permeabiliteetti on materiaalin merkittävin ominaisuus. Se määrittää, vahvistaako materiaali vai heikentääkö se magneettikenttää kappaleen sisällä.

2.3 Materiaalien magneettiset ominaisuudet

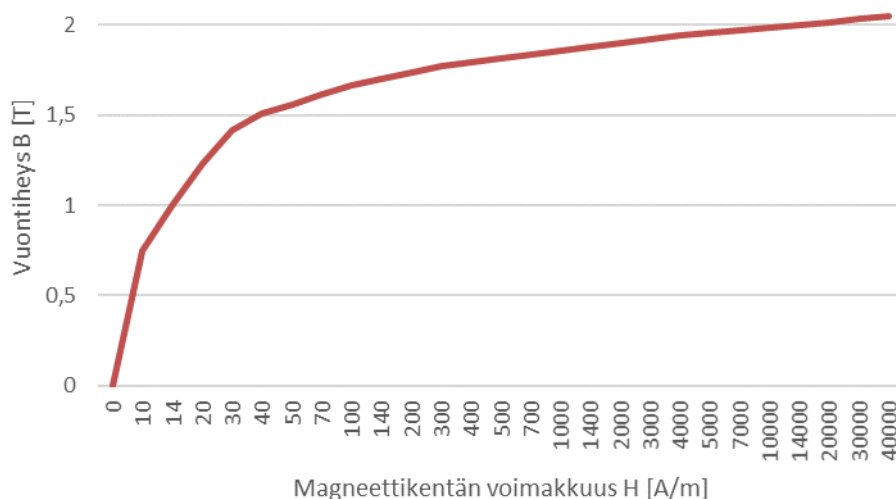
Magneettisten ominaisuuksien perusteella materiaalit jaetaan kolmeen ryhmään. Para-, dia-, ja ferromagneettisiin materiaaleihin. Para- ja ferromagneettisille materiaaleille on ominaista, että ne vetävät magneettikenttää puoleensa. Ilmiön voimakkuutta kuvataan materiaalin permeabiliteetilla. Mitä suurempi on materiaalin permeabiliteetti sitä voimakkaammin se vetää magneettikenttää puoleensa sekä vahvistaa sitä. Tämän vuoksi magneettisilla materiaaleilla sisäinen kenttä on suurempi kuin niiden ulkopuolinen kenttä. Paramagneettisilla materiaaleilla permeabiliteetti on hieman suurempi kuin yksi. Ferro-magneettisten materiaalin permeabiliteetti on paljon suurempi kuin yksi. Diamagneettisten materiaalien permeabiliteetti on pienempi kuin yksi, joten ne heikentävät magneettikenttää. (Young & Freedman 2004:1088–1090).

2.3.1 Permeabiliteettiin vaikuttavat tekijät

Magneettiin tarkkaa tarkastelua vaikeuttaa permeabiliteetin riippuvuus lämpötilasta, magneettikentän voimakkuudesta, suunnasta ja edeltäneestä magnetoinnista. Useilla ferromagneettisilla materiaaleilla permeabiliteetti kasvaa lämpötilan mukana Curie-pisteeseen saakka, jossa ne muuttuvat paramagneettisiksi. (Viljanen 2007: 89). Materiaalien magneettiset ominaisuudet saattavat muuttua myös valmistusvaiheiden aikana. Esimerkiksi epämagneettisen teräksen kiderakenne muuttuu, kun sitä käsitellään korkeassa lämpötilassa tai muokataan mekaanisesti. Tämän voi havaita helposti asettamalla magneetin hitsaussauman tai taivutetun kohdan päälle. Näihin magneetti tarttuu

kevyesti, mikä kertoo permeabiliteetin kasvusta. Tavallisesti nämä muokkautuneet alueet ovat niin pieniä pinta-alaltaan, että ne eivät aiheuta merkittäviä häviökeskittymiä.

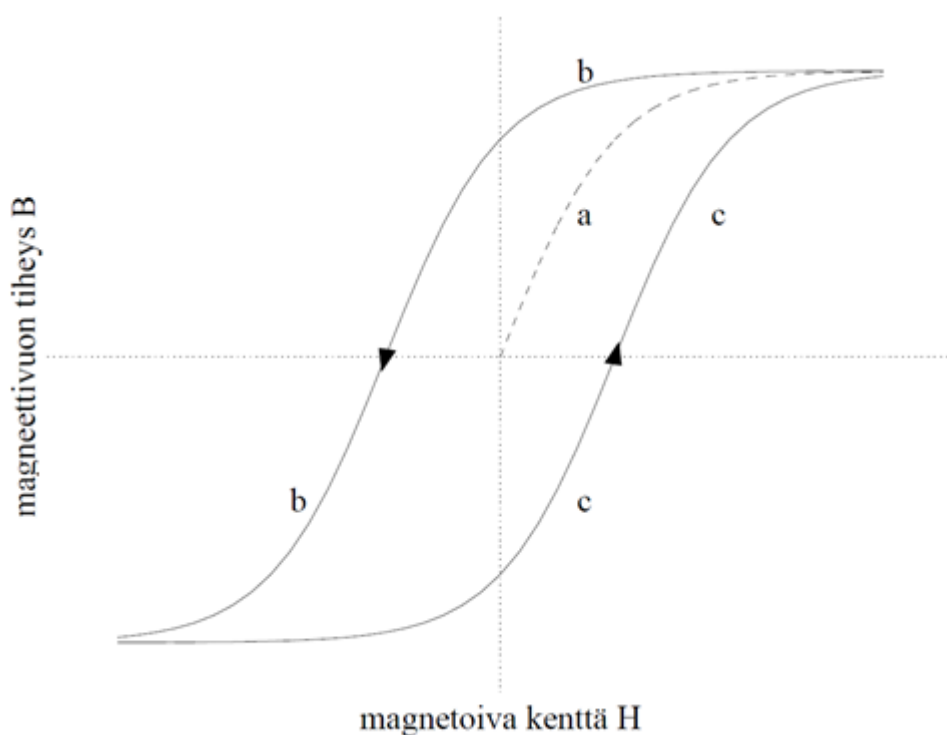
Yleensä samassa simulointimallissa kappaleiden lämpötilat ovat melko lähellä toisiaan, joten iteraatiokierroksia ei lämpötilan mukana muuttuneen permeabiliteetin vuoksi tarvitse tehdä. Muuntajien tapauksessa materiaalien permeabiliteetti tulisi määrittellä jatkuvuustilan toimintalämpötilassa. Käytännössä permeabiliteetti on usein tunnettu vain taulukoista löytyvässä 20 °C asteen lämpötilassa. Yleensä tästä johtuva virhe katsotaan olevan muiden virhelähteiden suuruusluokkaan nähden merkityksettömän pieni. Sen sijaan magneettikentän voimakkuudella on merkittävä vaikutus. Ilmiön suuruudesta saadaan käsitys, kun tarkastellaan kuvan 1 sydänlevylle tyypillistä magnetointikäyrää. Pie-nellä magneettikentän voimakkuudella sydänlevyn suhteellinen permeabiliteetti on suuruudeltaan useita kymmeniätuhansia, kun taas suurella magneettikentän voimakkuudella se on enää muutamia kymmeniä. Tällaisia materiaaleja kutsutaan epälineaariksi.



Kuva 1. Erään kidesuunnatun sydänlevyn B-H-käyrä.

2.3.2 Hystereesi

Edellä magneetoinnin ja vuontiheyden välistä suhdetta kuvataan permeabiliteetilla. Vaihtosähkölaitteissa magnetointi muuttuu jakson aikana vaihtaen myös suuntaansa. Ferromagneettisille materiaaleille on ominaista, että ne vastustavat tätä vuon muutosta. Magnetointisuunnan muuttuessa toiseen suuntaan tarvitaan kentän voimakkuuteen suurempi muutos vuontiheyden muuttamiseen. Tätä ilmiötä kutsutaan hystereesiksi, jota havainnollistetaan kuvan 2 magneetointikäyrällä. (Young and Freedman 2004: 1091).



Kuva 2. Ferromagneettisen materiaalin magneetointikäyrä (Viljanen 2007:90).

2.3.3 Koersiivisyys

Yleensä ferromagneettisista materiaaleista esitetään vain niiden hystereesikäyrä, joka havainnollistaa sydänlevyn kykyä vastustaa vuon suunnan muutosta eri magnetoinneilla. Magnet-simulointiohjelmassa on mahdollista määritellä tarkasti kyseinen hystereesi, jota tarvitaan tarkassa transienttiansalyysissa. Sen sijaan aikaharmonisissa simuloinneissa riittää, kun hystereesi kuvataan eräänlaisella keskimääräisellä hystereesillä, jota

kutsutaan koersiivisuudeksi. Suuren koersiivisuuden materiaaleja kutsutaan magneettisesti koviksi materiaaleiksi, ja niiden hystereesiä kuvaava magnetoimiskäyrä on leveä. Näitä ovat mm. kestmagneetit. Pehmeillä ferromagneettisilla materiaaleilla koersiivisyys on pieni, niiden magnetoimiskäyrä on kapea. Niistä valmistetaan kaiuttimia, muuntajia ja sähkömoottoreita. (Young and Freedman 2004: 1091).

3 Teräsosien jäähtymiseen vaikuttavat termodynaamiset ilmiöt

Luvussa 2 käsiteltiin materiaalissa syntyvä lämpöhäviö. Nyt saadaksemme selville kappaleiden lämpötilat täytyy määrittellä myös niihin vaikuttavat termo- ja virtausdynaamiset ilmiöt. Lämpötilan laskemiseksi simuloinnissa materiaaliin määritetään ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus kappaleen sisällä. Lisäksi kappaleiden pinnoille määritetään lämmön luovutustapoja kuvaavat arvot, joiden avulla saadaan selville kappaleen luovuttama lämpöteho. Lämpöä siirtyy kolmella tavalla: johtumalla, konvektiolla ja säteilemällä. Lämpövirran suunta on aina kuumemmasta kylmempään termodynamiikan 2. säännön mukaisesti (Jaakkola 2014: 59).

3.1 Lämpötilan vaikutus muuntajaan

Öljymuuntajan eristeiden vanhenemisnopeus riippuu voimakkaasti lämpötilasta, joten sen tarkka määrittäminen on tärkeää laskettaessa muuntajalle kannattavaa teknistä käyttöä. Jokainen 6–7 asteen lämpötilan nousu kaksinkertaistaa eristeiden kemiallisen vanhenemisnopeuden (ABB 2004:117). Samaan aikaan muuntajan tasavirtahäviöt kasvavat lämpötilan mukana. Niistä muodostuu suurin osa kuormitetun muuntajan kokonäishäviöistä, joten lämpötila vaikuttaa myös muuntajan hyötysuhteeseen. Muuntajan osat lämpenevät niissä syntyvien häviöiden sekä osien välillä siirtyvän lämpöenergian vaikutuksesta.

3.1.1 Johtuminen

Johtuminen on määrittelyltään yksinkertaisin lämmön siirtymistapa. Aineen sisäisten molekyylien ja atomien värähdellessä lämpötilan vaikutuksesta ne törmäävät jatkuvasti viereisiin. Törmäilyn jatkuessa lopulta molekyylit jakavat liike-energiansa viereisten kanssa ja siten tasaavat lämpötilan. Enemmän liike-energiaa sisältävät molekyylit luovuttavat osan liike-energiastaan viereisille molekyyleille ja tästä seuraa, että lämpö siirtyy aina kylmempiä molekyylejä kohti termodynamiikan 2. pääsäännön mukaisesti. Sama

ilmiö vaikuttaa myös nesteissä ja kaasuissa, vaikka niiden lämmönsiirrosta usein suurin osa tapahtuu virtauksen vaikutuksesta. Johtuva lämpövirta q yksiulotteisen pinnan läpi pinta-ala yksikköä kohti voidaan laskea seuraavasti

$$q_x = -k \frac{\Delta T}{L}, \quad (9)$$

missä k on materiaalille ominainen lämmönjohtavuus ($\text{W/m}\cdot\text{K}$), ΔT on lämpötilaero levyn yli ja L on levyn paksuus. Kertomalla lämpövirta q pinta-alalla saadaan selville kyseisen pinta-alan läpäisemä lämpöteho. (Incropera ym. 2011: 4).

3.1.2 Konvektio

Lämmön siirtotavoista konvektion vaikutus on haasteellisin määrittää tarkasti, koska sen voimakkuus riippuu useasta eri tekijästä. Konvektio kuvaa lämpöenergian siirtymistä kappaleesta sitä jäähdyttävään liikkuvaan aineeseen. Jäähdyttävä aine on käytännössä joko nestettä tai kaasua. Konvektiokerrointa määritettäessä tulee ottaa huomioon muun muassa dynaaminen viskositeetti, lämmönjohtavuus, paine, nopeus, kosteus, lämpötila, geometria, pintakäsittely ja pinnankarheus sekä virtaustyyppi. Näiden määrittelyn tekee erityisen hankalaksi se, että monet ominaisuudet riippuvat toisistaan. Esimerkiksi viskositeetti ilmaisee nesteillä virtauskitkaa. Lämpötilan noustessa useimpien nesteiden viskositeetti alenee. Ilmalla sen sijaan virtausvastus kasvaa lämpötilan noustessa. Konvektiota laskettaessa on aina enemmän tai vähemmän kysymys iteratiivisesta ratkaisusta. Edellä mainittujen muuttujien tarkka määrittäminen kussakin tilanteessa on usein vaikeaa ja siksi konvektiokerroin määritetään usein kokemusperäisesti tai kokeellisesti. Taulukossa 1 on esitetty suositeltavat lämmön luovutuskertoimet ilmalle ja öljylle vaaka- ja pystysuorilla pinnoilla.

Taulukko 1. Suositeltavat konvektiokerroimet (ABB 2008: 32).

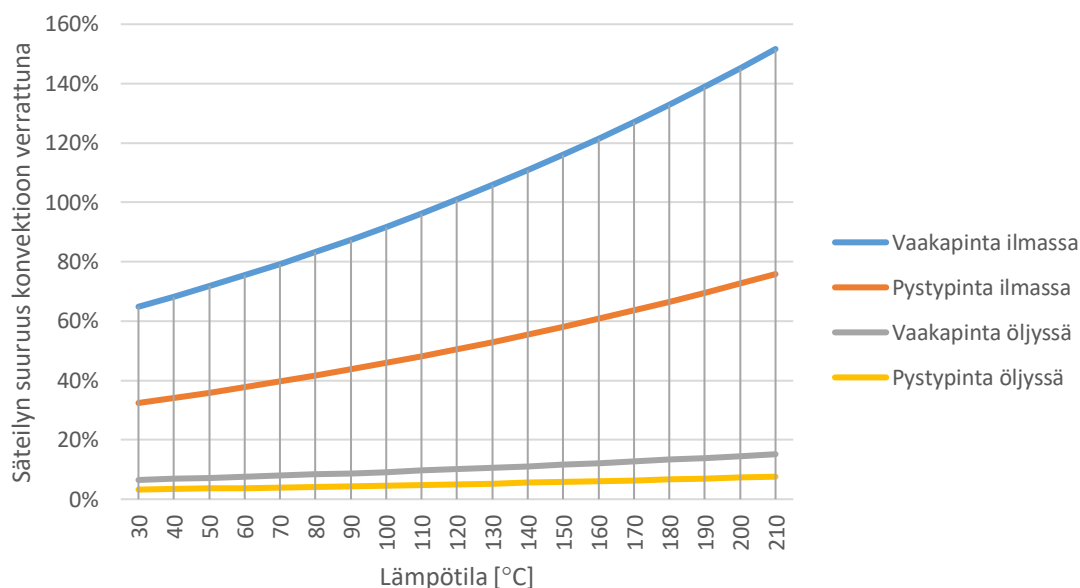
Pinnan asento	Konvektiokerroin	
	Kappale ilmassa [W/m ² K]	Kappale öljyssä [W/m ² K]
Vaakasuora pinta	4–5	40–50
Pystysuora pinta	8–10	80–100

3.1.3 Säteily

Lämmönsiirto säteilemällä perustuu sähkömagneettiseen aaltoliikkeeseen. Poiketen muista siirtymistavoista se ei tarvitse lainkaan väliainetta. Säteilemällä lämmönsiirto tapahtuu kahden pinnan välillä ilman, että pinnat koskettavat toisiaan. Kappaleen lämpötila vaikuttaa säteilyn aallonpituuteen. Esimerkiksi huoneenlämpöiset kappaleet säteilevät vain pitkällä aallonpituudella infrapunasäteilyä. Lämpötilan noustessa säteilyn aallonpituus lyhenee. Hyvin kuuma kappale, kuten hehkuva teräskappale alkaa tuottaa näkyvää valoa n. 800 °C lämpötilassa. Vieläkin kuumemmissa lämpötiloissa esiintyy myös ultraviolettisäteilyä, kuten auringon valossa ja oikosulun valokaassa. Kappaleen luovuttama säteilyvirta H voidaan laskea yhtälöllä

$$H = Ae\sigma(T^4 - T_s^4), \quad (10)$$

missä A on kappaleen pinta-ala, e on pinnalle ominainen emissiokerroin, σ on Stefan-Boltzmann vakio, T on kappaleen lämpötila ja T_s on kappaletta ympäröivän aineen lämpötila. Säteilyn teho riippuu voimakkaasti lämpötilaerosta ympäristöön nähden, sillä yhtälössä lämpötilat on korotettu neljänteen potenssiin. (Young and Freedman 2004: 668–669). Tavallisesti muuntajan lämpötila on niin matala sitä jäähdyttävään ympäristöön nähden, että säteilyn vaikutusta voidaan pitää lähes merkityksettömänä (ABB 2008: 32). Tämän työn kokeissa virtaavana aineena oli ilma, jolloin luovutuskertoimet ovat huomattavasti pienemmät. Kuvassa 3 on verrattu säteilyn vaikutusta konvektioon nähden kappaleen eri lämpötiloissa ympäristön lämpötilan ollessa 20 °C.



Kuva 3. Säteilyn ja konvektion keskinäinen vertailu vaaka- ja pystypinnoilla, jotka ovat ilmassa ja öljyssä.

Konvektion vaikutuksen laskennassa on käytetty taulukon 1 konvektiokertoimia ja emissiokertoimena on käytetty maalatululle pinnalle ominaista arvoa 0,9. Kuvasta 3 nähdään, että ilmajäähdytteinen vaakapinta luovuttaa yli 120 °C lämpötilassa enemmän lämpöenergiaa säteilemällä kuin konvektiolla. Tarkalleen ottaen emissiokerroin riippuu eri tavalla eri pintamateriaaleilla säteilyn aallonpituudesta. Tämän työn testien kannalta oleellista on tietää kunkin pinnan emissiokerroin lämpösäteilyn alueella eli 0,4–100 µm aallonpituuksilla (Incropera ym. 2011: 770). Kuvan 3 kaaviosta näemme, että ilmajäähdytteisissä osissa säteilyn vaikutusta ei voida pitää merkityksettömänä vaan se tulee ottaa huomioon simuloinnissa. Öljyjäähdytteisissä osissa konvektion vaikutus on niin suuri, että säteilyn vaikutus on siihen nähden hyvin vähäinen. Taulukossa 2 on esitetty simuloinneissa käytettyjä emissiokertoimia.

Taulukko 2. Pintojen emissiokertoimia lämpösäteilyn alueella (Mikron 2–9).

Materiaali	Lämpötila [°C]	Emissiokerroin
Alumiini, hapettumaton	25	0,022
Kupari	20	0,07
Maali	0–100	0,95
Ruostumaton teräs	20	0,16
Teräs	21	0,66

3.2 Lämmön siirtotapojen mallintaminen

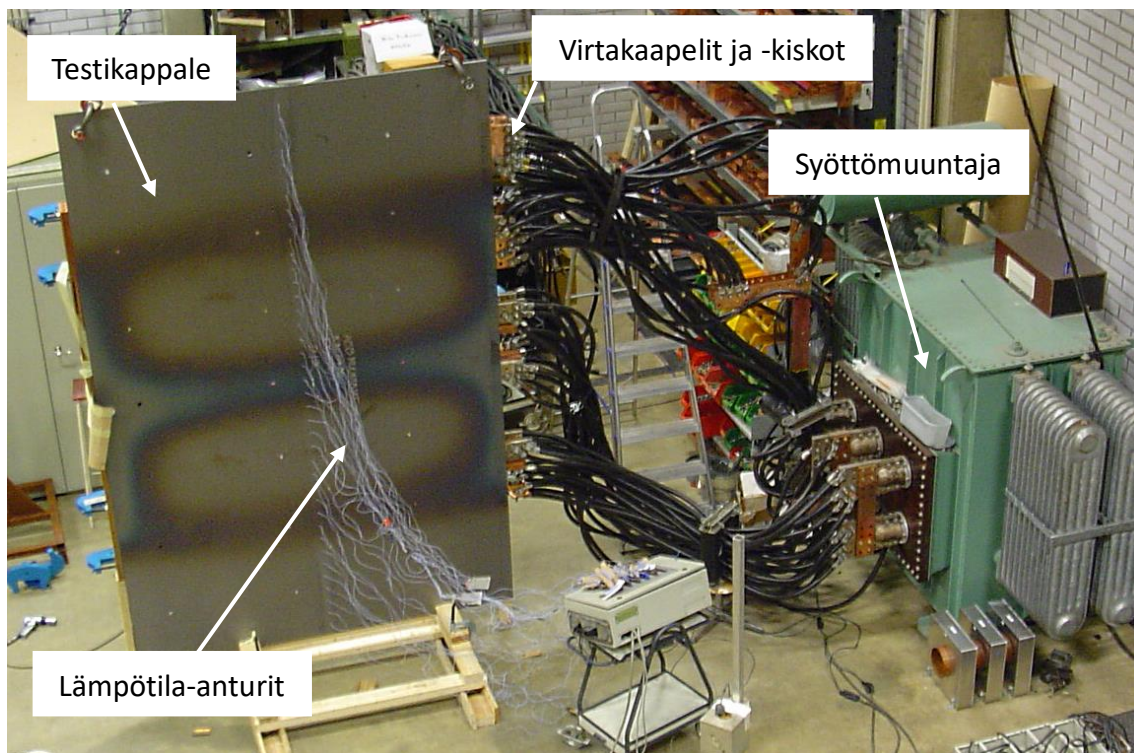
Luonnonilmiöiden tarkka mallintaminen on usein mahdotonta ja toisaalta myöskin tarpeetonta. Usein riittävän hyvällä approksimaatiolla saadaan luotettavia tuloksia. Esimerkiksi tässä työssä käytetyssä Thermal-simulointiohjelmassa käytetään kokemusperäisiä arvioita konvektion määrittämisessä. Sen sijaan säteily ja johtuminen voidaan määrittää helposti yksiselitteisesti. Tätä työtä tehdessä simulointien avulla huomattiin, että Thermal laskee vain kappaleelle luovutetun säteilyenergian, mikä vastaa tilannetta, että jokainen kappale olisi omassa avaruudessa tai äärettömän kaukana muista kappaleista. Todellisuudessa kappaleet luovuttavat ja myös vastaanottavat energiaa säteilyn välityksellä (Incropera ym. 2011:10). Thermal-ohjelmaan konvektio määritetään vakiolämmönluovutuskertoimenä [W/m^2K] tai vaihtoehtoisesti ohjelma voi laskea sille approksimaation seuraavien tietojen avulla: jäädyttävämateriaali, pinnan pituus ja asento. Lisäksi pakotetussa virtauksessa määritetään virtauksen suunta ja nopeus.

4 Aiemmat tutkimukset

Teräsosien lämpenemä on aiheuttanut historiassa monta kertaa ongelmia muuntajavalmistajille, joiden ratkaisemiseksi aihetta on tutkinut muun muassa Oy Strömberg Ab ja General Electric 1950- ja 1960-luvuilla. Muuntajien virtojen kasvamisen myötä uusien testien tekeminen nähtiin aiheelliseksi ABB:llä ja ne suoritettiin vuosina 2005 sekä 2010. Ensin mainituissa testeissä tutkittiin erilaisilla kiskostoilla magneettisten teräksien lämpenemää suojaamattomana sekä alumiini- ja kuparisuojauksilla, kun virtakiskot menevät testikappaleen pinnan suuntaan. Lisäksi tutkittiin virtakiskojen aiheuttamaa lämpenemää, kun virtakiskot menevät testikappaleessa olevien aukkojen läpi. (Heinonen 2006:55–56) Viisi vuotta myöhemmin nähtiin tarpeelliseksi täydentää mittausarjaa epämagneettisen teräksen mittauksilla. Molemmissa töissä lämpenemämittauksia laajennettiin simuloimalla suuremmilla sähkövirran arvoilla teräksessä syntyviä häviöitä ACE-ohjelmalla. (Dits 2010:22) Ohjelmalla voidaan simuloida ainoastaan kaksiulotteisesti, joten se soveltuu vain tapauksiin, joissa kiskot ovat testikappaleen suuntaisesti. Kaksiulotteisella mallilla jää huomioimatta läpivientikiskojen aiheuttamat laajemmat kiertovirrat, levyn reunojen häviökeskittymät sekä suojauksien pyörrevirtahäviöt. (Heinonen 2006:66–68)

4.1 Aiemmin suoritettut mittaukset

Mittauksissa kiskoston sähkövirta pidettiin vakiona niin kauan, että saavutettiin lähes muuttumaton tilanne eli testikappaleen lämpötilan nouseminen pysähtyi. Saavutettu tasapainotilanne vastaa simuloinnissa laskettavaa jatkuvuustilaa. Testikappaleiden lämpötilat tallennettiin koko lämmitysjakson ajan viiden minuutin välein tietokoneelle, mikä tarjoaisi mahdollisuuden kehittää lämpenemän transienttilaskentaa. Testien aikana mitattiin myös ympäristön lämpötila, jonka avulla voitiin selvittää testikappaleiden lämpenemä ympäristöön nähden. Lämpenemän selvittäminen on erityisen käytännöllistä muuntajien kannalta, koska niiden käytönaikaiset lämpötilat vaihtelevat useasta tekijästä riippuen. Ympäristön lämpötila vaihteli testien aikana 22–26 °C välillä. Kuvassa 4 näkyy lämpenemäkokeiden mittausjärjestely.



Kuva 4. Mittausjärjestelyn testikappale, lämpötila-anturit, virtakaapelit ja -kiskot sekä syöttömuuntaja.

4.2 Aiemmin suoritettut testit

Testeissä käytettiin kolmivaiheista kiskostoa, jonka vaiheet olivat päällekkäin 800 mm välein. Tarkemmin kiskoston yksityiskohdat on kuvattu liitteestä 1. Samalla kiskostolla suoritettiin 1-, 2- ja 3-vaiheisia testejä kompensoiduilla ja kompensoimattomilla vaihekiskoilla. Kompensoinnilla vaihekiskojen kohdalla tarkoitetaan tilannetta, jossa vastakkaiset yhtä suuret sähkövirrat kulkevat lähellä toisiaan suhteessa muiden rakenteiden etäisyyteen. Kompensointi on sitä parempi, mitä lähempänä vastakkaiset sähkövirrat ovat toisiaan. Kompensoiduissa kiskoissa molemmat sähkövirrat luovat ympärilleen Amperen lain mukaisen magneettikentän. Vastakkaisista sähkövirran suunnista johtuen kompensoitujen kiskojen magneettikentät ovat myös vastakkaiset ja kumoavat toisensa. Riittävän kaukana olevissa johtavissa materiaaleissa kompensoitujen kiskojen aiheuttamat pyörrevirrat ovat hyvin pieniä kompensoimattomiin kiskoihin nähden.

Testeissä 1–16 kiskoston viereen oli asetettu testikappale tutkittavalle etäisyydelle. Tällä pyrittiin selvittämään muuntajan säiliön seinän suuntaisten virtakiskojen aiheuttamaa lämpötilan nousua. Testeissä 17–29 kiskot menivät testikappaleissa olleista aukkoista läpi. Tällä pyrittiin selvittämään muuntajan läpivientikiskojen aiheuttamaa lämpenemää muuntajan kanteen tai säiliön seinään. Testeissä D1–D6 tutkittiin epämagneettisen teräslevyn lämpenemää suojaamattomana ja 4 mm kuparilla suojattuna, kun virtakiskot kulkevat testikappaleen pinnan suuntaan. Lisäksi testeissä D7–D12 tutkittiin LDT-muuntajalle tyypillisten sydämen puristuspalkkien lämpenemää virtakiskon ollessa rinnakkain ja poikittain niihin nähden. LDT-muuntajalla tarkoitetaan suuria jakelumuuntajia, joissa käytetään kotelopalkkeja niiden mahdollistaman yksinkertaisen puristusrakenteen ansiosta. Samaan aikaan niihin kohdistuu niiden muodosta johtuen suurempi osa hajavuosta kuin suurmuuntajissa käytettyihin levypalkkeihin. Suuremman hajavuon vuoksi niiden lämpötilojen hallitseminen on erityisen tärkeää. Kaikissa testeissä käytettiin samaa kiskosta ja syöttömuuntajaa. Testeissä vaihdeltiin sähkövirran, taajuuden ja etäisyyksien arvoja. Lisäksi tutkittiin virtakiskojen vaihe-etäisyyden ja kompensoinnin vaikutusta lämpötiloihin. Tulosten avulla voitiin selvittää muuntajan mitoituksen kannalta merkittäviä ominaisuuksia ja muodostaa likimääräisiä laskukaavoja lämpenemien arvioimiseksi. Taulukoissa 3 ja 4 on esitetty mittauksissa vaihdelleet muuttujat.

Taulukko 3. Vuonna 2010 suoritettut lämpenemäkoeket.

Testi nro	Kuvaus	Virrat (kA)	Aukkojen koko / etäisyydet (mm)	Taajuudet (Hz)	Syöttö	Testi-kappale
1	Suojaamaton teräslevy	3, 5, 7, 8.7	80	50	3-v.	1
2	Suojaamaton teräslevy	7	120, 160, 200	50	3-v.	1
3	Suojaamaton teräslevy	5	80	60, 166, 250	3-v.	1
4	Alumiinilla suojattu teräslevy	5, 7, 8.7	80	50	3-v.	2
5	Alumiinilla suojattu teräslevy	7	120, 160, 200	50	3-v.	2
6	Alumiinilla suojattu teräslevy	5	80	60, 166, 250	3-v.	2
7	Kuparilla suojattu teräslevy	5, 7, 8.7	80	50	3-v.	3
8	Kuparilla suojattu teräslevy	7	120, 160, 200	50	3-v.	3
9	Kuparilla suojattu teräslevy	5	80	60, 166, 250	3-v.	3
10	Suojaamaton teräslevy, vaiheväli 1600 mm	5, 9	80	50	1-v.	1
11	Suojaamaton teräslevy, vaiheväli 1600 mm	7	80, 120, 160	50	1-v.	1
12	Suojaamaton teräslevy, vaiheväli 800 mm	9	80	50	1-v.	1
13	Suojaamaton teräslevy kompensoinnilla	4.2	80, 120	50	3-v.	1
14	Suojaamaton teräslevy kompensoinnilla	4.2	80	50	2-v.	1
15	Alumiinilla suojattu teräslevy kompensoinnilla	4.2	80	50	2-v.	2
16	Kuparilla suojattu teräslevy kompensoinnilla	4.2	80	50	2-v.	3
17	Pienet läpivientiaukot teräslevyssä	3, 5, 6, 7	270x200	50	3-v.	4
18	Pienet läpivientiaukot teräslevyssä	5	270x200	60, 166, 250	3-v.	4
19	Pienet läpivientiaukot teräslevyssä kompensoinnilla	4.2	270x200	50	3-v.	4
20	Suuret suorakaideaukot teräslevyssä	3, 5, 6, 7	500x430	50	3-v.	5
21	Suuret suorakaideaukot teräslevyssä kompensoinnilla	4.2	500x430	50	3-v.	5
22	Epämagneettiset läpivientiaukot teräslevyssä	3, 5, 6, 7	270x200	50	3-v.	6
23	Epämagneettiset läpivientiaukot teräslevyssä	5	270x200	60, 166, 250	3-v.	6
24	Ympyräaukot teräslevyssä	3, 5, 6, 7	300	50	1-v.	7
25	Ympyräaukot teräslevyssä	5	300	60, 166, 250	1-v.	7
26	Ympyräaukot teräslevyssä	3, 5, 6, 7	500	50	1-v.	8
27	Ympyräaukot teräslevyssä	5	500	60, 166, 250	1-v.	8
28	Ympyräaukot teräslevyssä	3, 5, 6, 7	700	50	1-v.	9
29	Ympyräaukot teräslevyssä	5	700	60, 166, 250	1-v.	9

Taulukko 4. Vuonna 2015 suoritettut lämpenemäkokeet.

Testi nro	Kuvaus	Virrat (kA)	Etäisyydet. (mm)	Taajuudet (Hz)	Syöttö	Testi-kappale
D1	Suojaamaton epämagneettinen teräslevy	3, 5, 7, 9	80	50	3-v.	D1
D2	Suojaamaton epämagneettinen teräslevy	7	120, 160, 200	50	3-v.	D1
D3	Suojaamaton epämagneettinen teräslevy	5	80	60, 166, 250	3-v.	D1
D4	Kuparilla suojattu epämagneettinen teräslevy	3, 5, 7, 9	80	50	3-v.	D2
D5	Kuparilla suojattu epämagneettinen teräslevy	7	120, 160, 200	50	3-v.	D2
D6	Kuparilla suojattu epämagneettinen teräslevy	5	80	60, 166, 250	3-v.	D2
D7	Puristuspalkit rinnakkain	3, 5, 7, 9	80	50	3-v.	D3, D4, D5
D8	Puristuspalkit rinnakkain	7	120, 160, 200	50	3-v.	D3, D4, D5
D9	Puristuspalkit rinnakkain	5	80	60, 166, 250	3-v.	D3, D4, D5
D10	Puristuspalkit poikittain	3, 5, 7, 9	80	50	3-v.	D3, D4, D5
D11	Puristuspalkit poikittain	7	120, 160, 200	50	3-v.	D3, D4, D5
D12	Puristuspalkit poikittain	5	80	60, 166, 250	3-v.	D3, D4, D5

5 Teräsosien mallinnus ja simulointi

Simuloinnissa on usein haasteellisinta luoda käytännön tilannetta vastaava simulointimalli, koska käytännön tilanteeseen vaikuttavat useat ilmiöt yhtä aikaa. Lisäksi ne ovat harvoin täysin ideaaleja, kuten simulointiohjelmaan määritettävät ominaisuudet. Mallia määritettäessä joudutaankin tekemään yksinkertaistuksia. Sopivien yksinkertaistuksien tekemiseksi täytyykin tietää, miten ominaisuudet vastaavat käytännön tilanteita ja millä niistä on merkitystä selvittävän ilmiön kannalta. Monissa tapauksissa nämä pitää opetella yrityksen ja erehdyksen kautta. Yksi tapa tulosten oikeellisuuden ja luotettavuuden varmistamiseen on suorittaa useita laskukierroksia, joiden avulla voidaan selvittää, mitkä laskentaparametrit vaikuttavat tulokseen ja millä tavalla. Tästä helpoimmin ymmärrettävä esimerkki on laskentaverkon tihentäminen. Tietyn rajan jälkeen verkon tihentäminen ei vaikuta oleellisesti tuloksiin, jolloin tiedetään, että verkko on riittävän tarkka. Laskenta-ajan minimoiseksi verkko pyritään pitämään mahdollisimman harvana. Usein jopa hyväksytään kohtuullinen virhe tuloksissa laskenta-ajan säästämiseksi. Optimaalinen tulos tarkkuuden ja laskenta-ajan kannalta saadaan, kun verkotus määritetään erikseen jokaiseen komponenttiin. Tavallisesti koko kappaleen verkko pyritään pitämään harvana, mutta tulosten kannalta kriittisille pinnoille, särmiin ja nurkkiin määritetään tarpeen mukaan tiheämpi verkko. Verkotuksen yleisohjeena voidaan sanoa, että verkon pitää olla tiheä siellä, missä tutkittavan kentän muutos on voimakkainta.

5.1 Siemens Simcenter Magnet- ja Thermal- simulointiohjelmistot

Tämän työn simuloinnit suoritettiin Siemens Simcenter Magnet- ja Thermal-ohjelmistoilla. Työn alkuvaiheessa ohjelmistot olivat vielä Infolytican omistuksessa nimellä Magnet ja ThermNet. Siemens osti Infolytican vuonna 2017. Magnet on matalataajuisten sähkömagneettikenttien elementtimenetelmään perustuva simulointiohjelmisto, jota käytetään moottoreiden, generaattoreiden, antureiden, muuntajien, toimilaitteiden ja solenoidien 2- ja 3-ulotteisissa aikaharmonisissa sekä transienttianalyseissa. Sillä voidaan laskea simulointimallin häviöt ja saman tuoteperheen Thermal-ohjelman avulla saadaan selville häviöiden aiheuttamat lämpötilojen nousut rakenteissa. Magnet on

keskittynyt sähkömagneettisiin ilmiöihin, eikä siinä ole monille sen kilpailijoille tyypillisiä multifysiikkaominaisuuksia. Sähkömagneettisissa ongelmissa Magnet on kuitenkin erinomainen ohjelmisto, koska sillä voidaan laskea johtavia ja magneettisia materiaaleja ottaen huomioon muun muassa tarkat virranjakaumat, pyörrevirrat sekä sähkövirran läheisyysvaikutukset. Kehittynyt materiaalien määrittely mahdollistaa epälineaariset lämpötilasta ja suunnasta riippuvat materiaalit. Magneettisille materiaaleille voidaan määrittää myös hystereesi ja laskea sen aiheuttamat häviöt. Simulointimalliin asetettavien virta- ja jännitelähteiden välille voidaan muodostaa piirikaaviossa kytkentöjä. Tämä monipuolistaa ja helpottaa isojenkin järjestelmien mallintamista, kun piirin lähteiden tehot voivat riippua simuloituista impedansseista. (Siemens 2022)

5.2 Simulointitulosten luotettavuus

Usein simuloinnin suorittaja kohtaa tilanteita, joissa värikuviin luotetaan liikaa ja tulosten kuvitellaan olevan absoluuttisesti totta. Näin ei kuitenkaan usein ole ja siksi kaikkien mallinnettavien tilanteiden tuloksia on välttämätöntä kyseenalaistaa ja tarkistaa käytännön mittausten avulla, vaikka ohjelmiin on määritelty materiaalien fysikaaliset ominaisuudet oikein ja ohjelma laskee matemaattisesti ja fysikaalisesti kaiken oikein. Käytännön tilanteissa on niin paljon epäideaalisuuksia ja tulokseen muulla tavoin vaikuttavia tekijöitä, että simuloinnilla saatavat tulokset voivat olla jopa väärä ja hyödyttömiä. Filosofian tri Hasse Nordman kuvaa näitä simuloinnin haasteita mielestäni osuvasti; simulointiohjelmat ovat vain tunnettujen tapausten ekstrapolointiohjelmia tuntemattomiin tapauksiin ja toisaalta ilman mittaustuloksia simulointi on sama asia kuin piirianalyysi ilman maadoituspistettä. Mielestäni nämä kaksi lausahdusta kuvaavat simuloinnin tarkkuuden rajallisuutta osuvasti. Ilman maadoituspistettä piirianalyysitulokset voivat olla mielivaltaisia, vaikka laskumenetelmä on muilta osin oikea. Nämä simuloinnissa esiintyvät haasteet ovat yksi merkittävä syy tämän työn tekemiseen. Suoritettujen mittausten simuloinnilla saadaan laskennalle hyvä maadoituspiste eli lähtökohta ja samalla muodostetaan käsitys tulosten luotettavuudesta erilaisissa tilanteissa. Laajan mittausaineiston käsittelyllä myös kehitetään simulointirutiinia sekä määritetään käyttökelpoisia materiaali-parametreja.

5.3 Sähkömagneettisten ilmiöiden simuloiminen

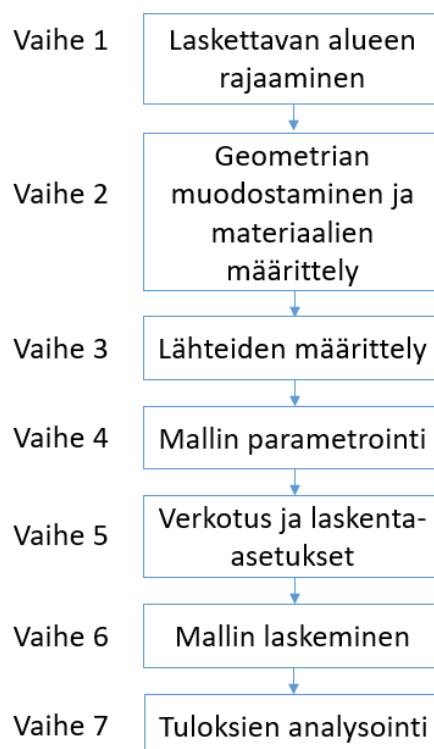
Käytännön koneissa esiintyviä ilmiöitä voidaan harvoin yksinkertaistaa niin paljon, että ne voitaisiin ratkaista luvussa 2 esitettyjen differentiaaliyhtälöjen avulla. Käytännön ongelmien monimutkaisesta geometriasta johtuen niiden laskeminen analyttisesti kentäteorian avulla on usein käytännössä mahdotonta. Kiertääksemme vaikeita ja pitkiä laskutoimituksia voimme ratkaista halutut tulokset käytännön ongelmasta elementtimenetelmään perustuvalla simuloinnilla. Elementtimenetelmän avulla laskeminen on periaatteessa helppoa, mutta sen hankaluutena on simulointimallin oikea määrittely ja tulosten järkevyyden varmistaminen. Joitakin virheitä mallinnuksesta voidaan havaita tarkastelemalla simulointimallin sähkövirran-, häviöiden- ja voidenjakaumia. Tuloksena saatujen lähteiden sähkövirtojen, jännitteiden sekä kappaleiden häviöiden suuruusluokat voivat myös kertoa virheellisestä simulointimallista. Näiden tarkastelujen suorittamiseksi simuloijan on lähes välttämätöntä osata laskea mallin tuloksien suuruusluokkia muilla, likimääräisillä menetelmillä. Esimerkiksi magneettipiirien tapauksessa Amperen lain käyttäminen on hyödyllistä (Edwards 2015:1).

Sähkövirran aiheuttaman korkeiden lämpötilojen simulointien kalibroimisessa haasteena on, että mittaustuloksiin vaikuttaa yhtä aikaa sekä sähkömagnetismi että termodynamiikka. Varsinkin termodynamiikan osalta jouduttiin tekemään kokemusperäistä arviointia sopivista lämmönluovutuskertoimista kullekin pinnalle. Todellisuudessa kussakin paikassa virtaukset vaikuttavat voimakkaasti toteutuneeseen lämmönluovutuskertoimeen. Toisaalta sähkötekniikan puolella materiaalien ominaisuuksiin vaikuttaa muun muassa lämpötila, jonka vaikutus jätettiin huomiotta. Kahden fysiikan alan ongelman simulointitulosten kalibroinnissa on haasteena selvittää, mistä tuloksien erot johtuvat.

5.4 Mallinnusprosessi

Simuloinnissa pyritään ensin mallintamaan mittaustapahtuma niin hyvin kuin mahdollista. Käytännön tilannetta vastaavan geometrian, materiaalien ominaisuuksien ja mallia

syöttävien lähteiden määrittelyn avulla simulointiohjelma laskee magneettivuontiheydet kussakin kohdassa. Vuontiheyden ja materiaalien ominaisuuksien avulla simulointiohjelma laskee kappaleessa syntyvät sähkövirrat ja niiden aiheuttamat häviöt. Tämän jälkeen siirrytään lämpömallin laskentaan Thermal-ohjelmalla, jossa kappaleiden pinnoille määritetään säteilyä ja konvektiota kuvaavat arvot. Niiden avulla simulointiohjelma ratkaisee lämpötilan kussakin kohdassa. Elementtimenetelmäpohjainen simulointiprosessi voidaan jakaa kuvan 5 mukaisesti seitsemään eri vaiheeseen.

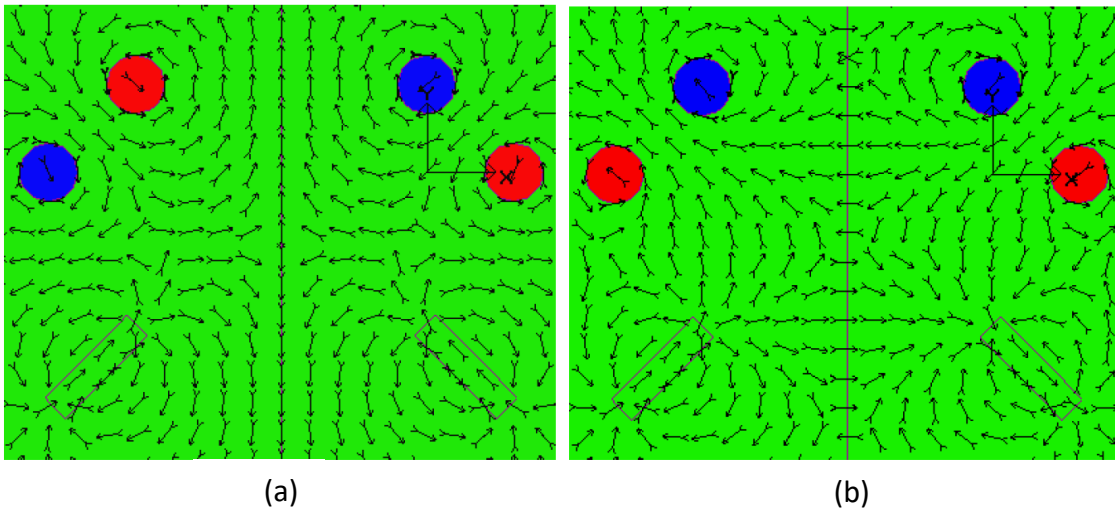


Kuva 5. Mallinnusprosessin vaiheet (ABB 2008:29).

5.4.1 Laskettavan alueen rajaaminen

Simulointiprosessin ensimmäisessä vaiheessa rajataan laskettava alue mahdollisimman pieneksi laskennan nopeuttamiseksi. Joissakin tapauksissa mallin pienentämisen myötä voidaan parantaa ohjelman laskentatarkkuutta, kun taas paljon muistia kuluttavissa malleissa joudutaan tekemään kompromisseja laskentatarkkuuden ja kohtuullisen laskentaajan välillä. Monet kolmiulotteisista ongelmista voidaan yksinkertaistaa kaksiulotteisiksi

ilman merkittävää virhettä tuloksissa. Esimerkiksi aksiaalisesti symmetriset ongelmat kannattaa ratkaista 2D-laskennan avulla. Myös joissakin tapauksissa kappaleen alun ja lopun vaikutus on hyvin vähäinen, jolloin kappale voidaan olettaa äärettömän pitkäksi. Tällöin karteesisen koordinaatiston avulla saadaan 2D-laskennan tulokset laskenta-ajan murto-osassa 3D-laskennan tuloksiin nähden. Mikäli mallista löytyy samanlaisia alueita tai jaksollisuutta, voidaan laskettava alue jakaa rajapintaehtojen avulla pienempiin osiin. Simulointimalliin luodaan ilmalaatikko, joka määrittää laskettavan alueen. Oletuksena on, että sen kaikilla ulkopinnoilla kentän suunta on tangentialinen. Tämä vastaa tilannetta, jossa mallin jokaisella ulkopinnalla olisi samanlainen systeemi peilikuvana, joka ei vaikuta laskettavaan alueeseen. Useimmissa tapauksissa tangentialisen kentän määrittely on riittävä. Joissakin tapauksissa symmetriaan perustuen simulointimalli voidaan jakaa myös määrittämällä kentän suunta normaaliksi ulkopinnalle. Kuvassa 6 on esitetty tangentialinen ja normaalin suuntainen mallin jakaminen. (ABB 2008:20).

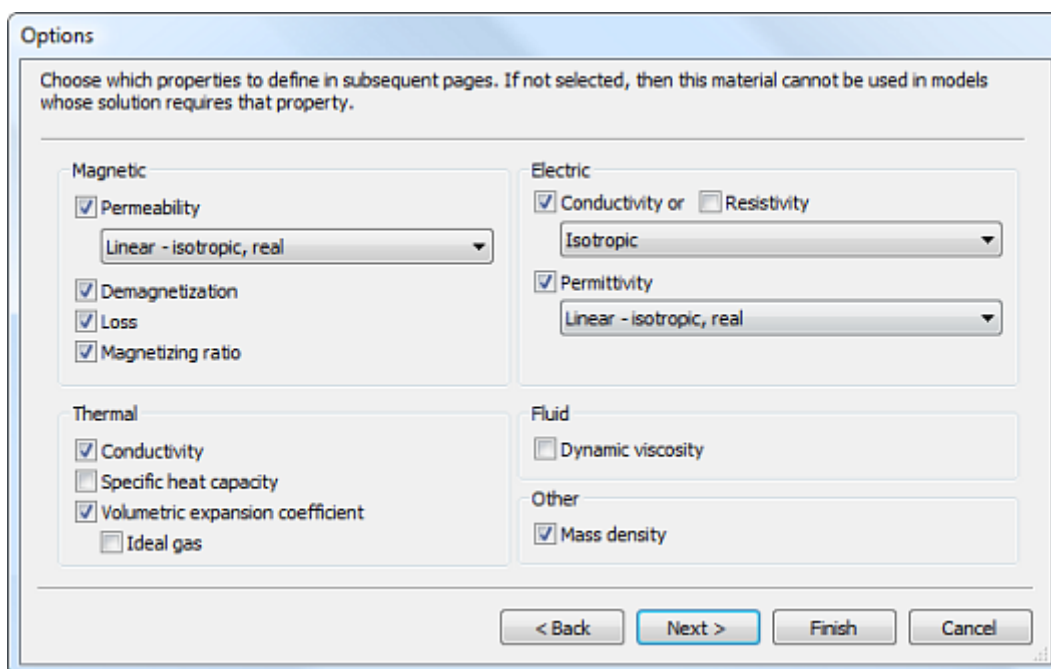


Kuva 6. Esimerkit symmetrisistä tilanteista tangentialinen kenttä (a) ja normaalin suuntainen kenttä (b) (ABB 2008:20).

5.4.2 Geometrian muodostaminen ja materiaalien määrittely

Toisessa vaiheessa määritetään geometriset osat ja niille materiaali. Geometria voidaan joko luoda Magnet -ohjelman geometriatyökaluilla tai vaihtoehtoisesti se voidaan tuoda SAT-muodossa CAD-ohjelmistoista. Ohjelman omilla grafiikkatyökaluilla voidaan luoda

yksinkertaista geometriaa yhdistelemällä ja leikkaamalla muun muassa seuraavia muotoja: pallo, suorakulmainen särmiö, sylinteri, kartio, toroidi, särmiö sekä tetraedri. Monimukaisempia muotoja voidaan luoda piirtämällä kappaleen poikkileikkaus ja pursottamalla sitä viivaa, kaarta tai niiden yhdistelmää pitkin. Magnet kirjoittaa automaattisesti istunnon komennoista Visual Basic Script -kielellä lokitiedostoa, jota muokkaamalla on helppo tehdä toistuvia komentosarjoja geometrian muodostamiseen. Geometrian määrittelyn yhteydessä jokaiselle komponentille valitaan materiaali materiaalikirjastosta. Materiaalikirjastoon voidaan luoda myös itsemääriteltyjä materiaaleja. Kuvassa 7 näkyy materiaalieditorin sivu, jossa valitaan kirjastoon lisättävälle materiaalille määritettävät fysikaaliset ominaisuudet.



Kuva 7. Materiaalin ominaisuuksien valintaikkuna.

Magneettisina ominaisuuksina materiaalille voidaan määrittää permeabiliteetti, magneetointi, häviöt sekä magnetointisuhde. Permeabiliteetti voidaan määrittellä lineaariseksi tai epälineaariseksi. Lisäksi se voidaan määrittää koordinaatiston jokaiseen suuntaan erillaiseksi. Epälineaarinen sunnasta riippuva laskenta kasvattaa tarvittavien iteraatiokierrosten määrää, millä on merkittävä vaikutus laskenta-aikaan. Epälineaarille

differentiaaliongelmille ei ole yksiselitteistä ratkaisua, joten ohjelman täytyy ensin muodostaa mallista lineaarisoitu versio ratkaisua varten. Monissa tapauksissa lineaarisen mallin ratkaiseminen riittää antamaan tarvittavat tulokset, mutta esimerkiksi epälineaaristen ferromagneettisten materiaalien häviöiden tarkasteluun tarvitaan epälinearisuuden huomioivaa laskentaa.

5.4.3 Lähteiden määrittely

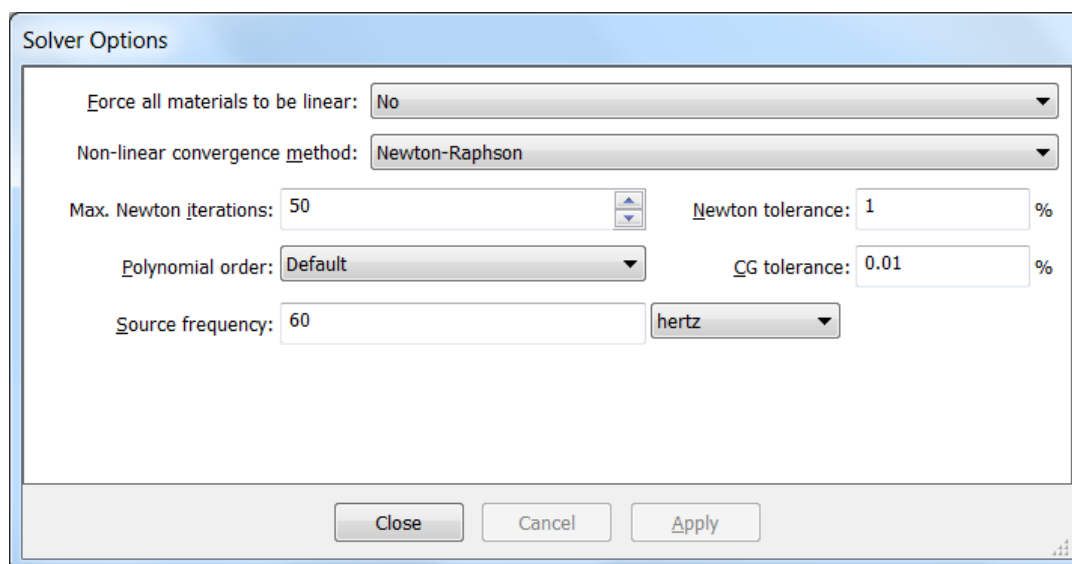
Kolmannessa vaiheessa määritetään lähteet, joita kutsutaan ohjelmassa käämeiksi. Ne määritetään kappaleen poikkileikkaukseen tai kahden kappaleen väliselle pinnalle. Käämit voidaan määrittää yhtenäisiksi tai monisäikeisiksi. Yhtenäisissä lähteissä sähkövirta jakautuu impedanssin mukaan epätasaisesti pinnalle. Monisäikeisellä lähteellä pakotetaan koko poikkipinnalle tasainen virranjakauma. Käämit voivat olla tyypeiltään jännite- tai virtalähteitä. Niiden välille voidaan myös määrittää monimutkaisia kytkentöjä erillisessä piirikaavioikkunassa, mikä mahdollistaa niiden arvojen riippuvuuden simulointimallin ratkaisusta. Piirikaaviossa on myös mahdollista lisätä malliin peruskomponentteja, kuten vastuksia, kondensaattoreita, keloja, kytkimiä ja diodeja. Tietyissä tilanteissa ideaaleilla komponenteilla voidaan korvata elementtimenetelmällä laskettavaa geometriaa ja siten vähentää mallinnustyötä sekä joissakin tapauksissa lyhentää laskenta-aikaa.

5.4.4 Mallin parametointi

Neljännessä vaiheessa syötetään malliin parametrit, joiden avulla voidaan muuttaa geometriaa, vaihtaa kappaleiden materiaaleja, verkotusta, sijaintia, syötettyä sähkövirtaa tai jännitettä. Toisin sanoen parametrien avulla voidaan testata yhdellä simuloinnilla useita eri tapauksia. Tästä on hyötyä varsinkin, kun halutaan etsiä sopivinta ratkaisua. Tämän työn simuloinneissa on käytetty parametreja kappaleen etäisyyden, kiskoston sähkövirran ja taajuuden muutoksiin. Lisäksi mallin parametrilistassa on kymmeniä ohjelman asetuksia.

5.4.5 Verkotus- ja laskenta-asetukset

Viidennessä vaiheessa määritetään verkotus- ja laskenta-asetukset. Verkotuksella kaksiulotteinen malli jaetaan kolmioihin ja kolmiulotteinen malli tetraedreihin. Malli ratkaistaan näiden kaikissa nurkissa. Tiheämpi verkotus antaa tarkempia tuloksia, mutta kasvattaa vastaavasti laskenta-aikaa. Ratkaistavasta ongelmasta riippuen riittävän tiheän verkotuksen löytää vain kokeilemalla. Kaksiulotteisissa ja pienissä kolmiulotteisissa mallissa saattaa olla mahdollista käyttää koko mallissa hyvin tiheää verkkoa. Yleensä verkko kuitenkin määritellään erikseen kuhunkin kappaleeseen. Tarvittaessa se voidaan määrittää erikseen pinnoille, reunoilla ja nurkkiin. Toisinaan saattaa olla hyödyllistä verkotuksen kannalta jakaa mallin kappaleita osiin. Nyrkkisääntönä verkotuksessa voidaan pitää, että verkon pitää olla tiheä kohdissa, missä kentän muutos on voimakkaimmillaan. Oletuksena Magnet määrittää yleensä kohtuullisen hyvän verkon. Toisaalta ohjelma ei voi tietää, mitkä ilmiöt ja alueet ovat kyseisessä mallissa tärkeitä. Siksi simulointimalliin on hyvä määrittellä manuaalisesti nämä voimakkaan muutoksen alueet, jotka ovat tulosten kannalta merkittävillä alueilla. Kuvan 8 laskenta-asetusikkunassa määritetään materiaalien käsittelytapa, iterointimenetelmä, tarkentumiskriteeri, muodostettujen yhtälöiden asteluku sekä taajuus.



Kuva 8. Laskenta-asetusikkuna.

5.4.6 Mallin laskeminen

Kuudennessa vaiheessa ratkaistaan simulointimalli halutulla ratkaisijalla tutkittavasta ilmiöstä riippuen. Vaihtoisia ratkaisuja ovat staattinen, aikaharmoninen, transientti tai transienttianalyysi yhdistettynä liikkeeseen. Näitä kaikkia voidaan laskea kaksi- tai kolmiulotteisesti.

5.4.7 Tulosten arviointi

Seitsemännessä vaiheessa piirretään halutut kuvaajat ja animaatiot sekä poimitaan tarvittavat lukuarvot. Ennen tulosten analysointia on tärkeää tarkistaa mallin oikeellisuus ja tulosten järkevyyt. Yksi suositeltava ja karkea menetelmä on varmistaa, että johteiden virrantiheydet ovat järkevän suuruisia. Niiden ei pitäisi ylittää 4 A/mm^2 . Vastaavasti taas ruostumattoman teräksen virrantiheyden pitäisi pysyä alle 1 A/mm^2 . (ABB 2008: 14)

6 Lämpenemäkokeiden simulointi

Tämän työn lämpenemäkokeet oli dokumentoitu poikkeuksellisen tarkasti. Kaikista tutkittavista kappaleista ja niiden lämpötila-antureiden sijainneista oli piirretty selvät kuvat. Poikkeuksen tähän teki LDT palkin lämpötila-antureiden numeroinnin ja sijaintien puuttuminen. Hajakenttää tuottava kiskosto oli myös kuvattu tarkasti. Virtakiskojen kytkennät on selitetty sanallisesti aiemmissa opinnäyte- ja diplomitöissä. Testijärjestelyistä mitatuista sähkövirroista ja lämpötiloista on tiedot Excel-tiedostoissa, joiden avulla on mahdollista vertailla myös lämpötilajakaumia. Lisäksi koejärjestelyistä on olemassa useita simulointimallin luomista helpottavia valokuvia. Simuloinnin näkökulmasta olikin hyvin erikoista, että aloitettaessa simulointia oli jo mittaustulokset saatavilla. Yleensä simulointia käytetään suurivirtaisten muuntajan suunnittelussa ennalta virheiden ja ongelmien välttämiseen, jolloin mittaustuloksia ei ole simulointivaiheessa saatavilla. Koejärjestelyistä otettujen valokuvien avulla voitiin täydentää puuttuvat tiedot kiskojen asemoinnista kunkin mittauksen aikana.

6.1 Koejärjestelyn vaihevirrät

Simuloinnin ja käytännön mittauksien välillä saattaa olla arvaamattomia eroavaisuuksia. Toteutetuissa mittauksissa yksi tällainen vaikeasti ennakoitava ero on vaihevirtojen epäsymmetria. Syöttömuuntaja oli kytketty kaapeleilla kokeen kiskostoon, joiden kulkureiteistä johtuen vaiheiden välille syntyi merkittävä reaktanssiero ja jännitehäviö. Tämän vaihe-epäsymmetrian myötä vaiheiden virrat olivat myös eri suuret. Usein muuntajan toisiovirta määritetään mitatun ensiövirran ja muuntosuhteen avulla. Tämän työn mittauksissa kaapelit menivät virtamuuntajien läpi, joiden avulla saatiin selville toteutuneet vaihevirrät. Yleensä simuloinnissa käytetään nimellisiä virtoja ja vaihekulmia, vaikka todellisuudessa ne saattavat poiketa merkittävästi, kuten tässä tapauksessa. Vaihevirtojen ero tavoitevirtaan nähden on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Mittauksessa 4 mitatut kiskoston virrat.

Tavoite- virta	Virta, ylin kisko (kA)	Virta, keskimäinen kisko (kA)	Virta, alin kisko (kA)
5	3,89	5,01	4,6
7	5,5	7,05	6,48
9	6,8	8,72	8,02

Yleensä muuntajan fyysisestä rakenteesta johtuen keskimmaiselle vaiheelle syntyy kompensoinnin vaikutuksesta pienempi reaktanssi ja siksi siinä kulkee hieman suurempi virta kuin laitavaiheilla. Se ei kuitenkaan selitä mittauksessa saatua yli 20 % eroa vaihevirtojen suuruudessa. Kuvasta 4 nähdään, että kahden alimman vaiheen kiskojen kaapelit menivät lähes samassa nipussa lattiaa pitkin kiskoihin. Ylimmän vaiheen kiskojen kaapelit oli asennettu selvästi ylemmäksi ja erilleen kahdesta muusta vaiheesta. Samassa nipussa kulkevat vaiheet kompensoivat osittain toisiaan. Tämän vuoksi niiden kaapeleihin syntyy merkittävästi pienempi induktanssi ja jännitehäviö, jolloin niissä kulkee myös suurempi virta. Symmetrian parantamiseksi kaikki kaapelit olisi kannattanut kuljettaa samassa nipussa kiskoihin. Toisaalta toteutunut epäsymmetrisyys antoi yhdellä mittauksella kolmen erisuuruisen sähkövirran aiheuttaman lämpötilojen nousun. Tämä täytyi ottaa huomioon simuloinnissa saadaksemme mittauksia vastaavia tuloksia.

6.1.1 Vaihevirtojen vaihekulmat

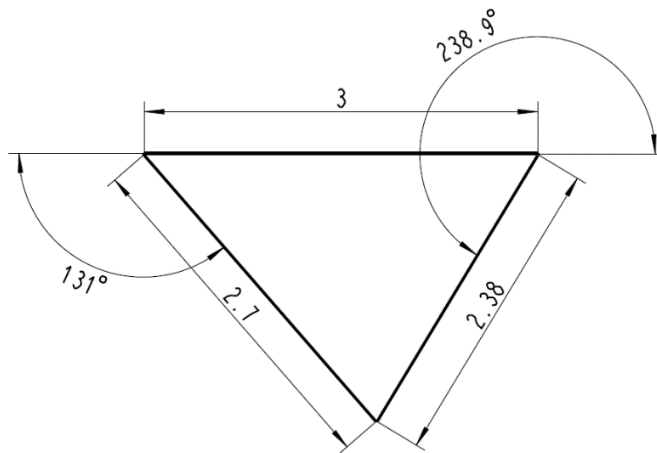
Simuloinnin kannalta vaihevirtojen epäsymmetrisyys aiheuttaa määrittelyhaasteen. Simulointimallin virtapiirin pitää olla matemaattisesti oikein, jotta se voidaan ratkaista. Simulointimallissa ei voida määritellä virtoja 120 asteen vaihesiirrolla erisuuruisiksi, kuten tavallisesti kolmivaiheisia systeemejä mallinnettaessa määritetään. Solmupisteeseen tulevien virtojen summa pitää olla yhtä suuri kuin solmupisteestä lähtevien virtojen summan. Tämä tarkoittaa, että koejärjestelystä mitattujen virtojen amplitudeja ei voida saavuttaa nimellisillä vaihekulmilla. Kolmannen vaiheen virran suljetussa piirissä ohjelma laskee automaattisesti. Simulointia varten vaiheiden väliset kulmat ratkaistiin

trigonometrialla kosinilauseen avulla. Taulukossa 6 on esitetty 3 kA tavoitevirralla mitatut vaihevirrat ja niille lasketut vaihekulmat.

Taulukko 6. Vaihekiskojen sähkövirrat ja niiden vaihekulmat.

	Virra (kA)	Vaihekulma (°)
Ylin vaihe	2,38	238,9
Keskimmäinen vaihe	3,0	0
Alin vaihe	2,7	131

Vektorilaskujen oikeellisuuden varmistamiseksi kuvaan 9 on piirretty koejärjestelystä mitattujen virtojen itseisarvojen pituiset viivat kolmion muotoon ja mitattu niiden väliset kulmat.

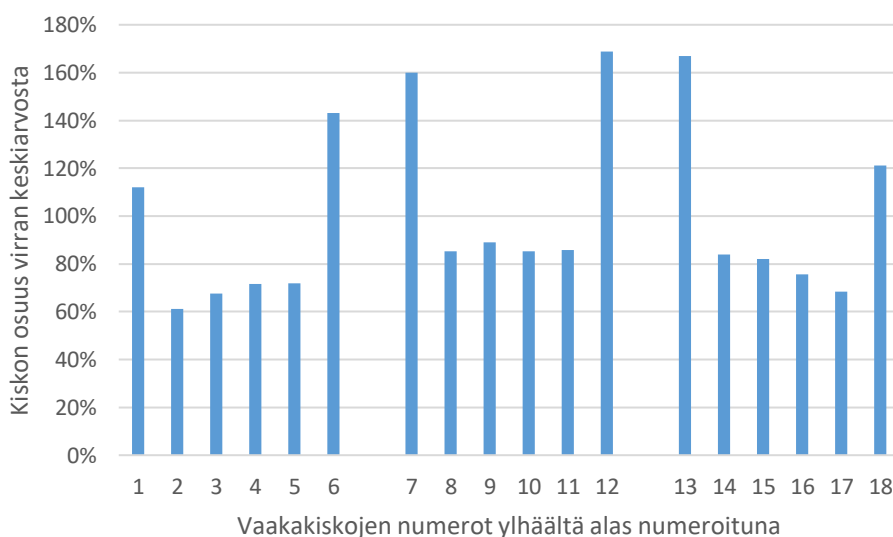


Kuva 9. Vaihevirtojen itseisarvot ja kulmat vektorikaaviona.

6.1.2 Kiskoston virranjako

Tarkemmin tarkasteltaessa simulointimallista nähdään, että virrat jakautuvat epätasaisesti rinnakkaisten kiskojen välillä. Kiskojen välisen virranjaon ja virrantiheyksien tarkistaminen onkin usein ensimmäisiä toimenpiteitä, mitä kannattaa tehdä ensimmäisen simulointikierron jälkeen mallin oikeanlaisen toiminnan varmistamiseksi. Helpoiten tämän näkee virranjakauman kuvasta. Kulkeeko virta ajateltua reittiä ja mitkä ovat suurimmat virrantiheydet mallin eri osissa? Tämä on yksi parhaista tavoista selvittää, onko

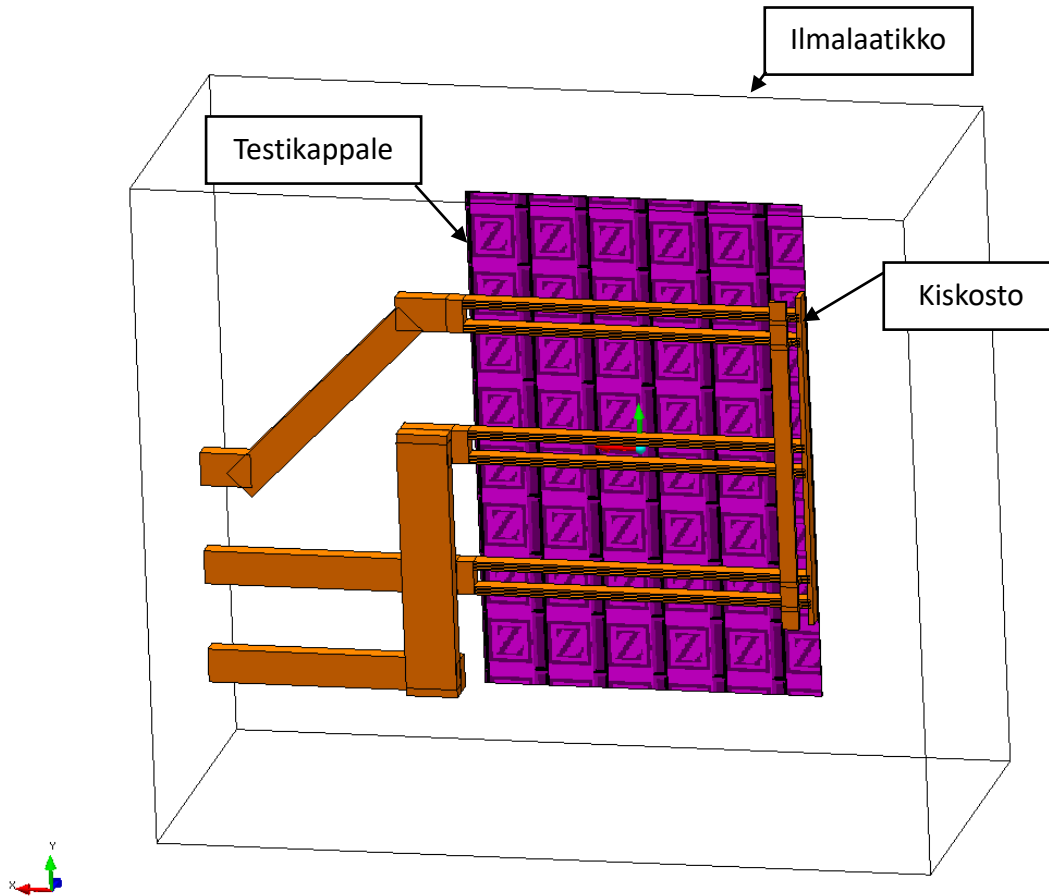
simulointimalli määritelty oikein ja ovatko siihen määritellyt virtatiet jatkuvia. Varsinkin muista mallinnusohjelmista tuoduilla geometrioilla saattaa malliin syntyä pieniä epäjatkuvuuksia tai ylimääräisiä oikosulkuja, jolloin virran reitti muuttuu ja saadaan virheellisiä tuloksia. Koejärjestelyssä jokaisen vaiheen kiskot olivat kahdessa kolmen kiskon nipussa. Kiskot olivat niin lähellä testikappaleita, että virranjako pitää huomioida. Toteutuneeseen virranjakaumaan vaikuttavat rinnakkaisten vaihekiskojen välillä virranahto sekä viereisten vaiheiden aiheuttama läheisyysvaikutus. Kuvassa 10 näkyy kiskojen välinen virranjakauma.



Kuva 10. Laskettu virranjakauma vaakakiskostossa.

6.2 Simulointimalli

Luvussa 5 selvitetään mallinnusprosessin eteneminen, jonka mukaan rakennettiin mittausjärjestelyjä vastaava simulointimalli Magnet:n omilla geometriatyökaluilla. Simuloinneissa käytettiin kuvan 11 mukaista simulointimallia, jossa vaihdeltiin testikappaleita eri asennoissa sekä tutkituilla etäisyyksillä. Mittausjärjestelyn simulointimalli rajattiin mahdollisimman pieneksi ja siihen sisällytettiin ainoastaan virtakiskot ja tutkittava testikappale sekä laskenta-alueen määrittävä ilmalaatikko. Syöttömuuntaja korvattiin mallissa kahdella ideaalilla virtalähteellä.



Kuva 11. Simulointimalli.

Malliin valittujen komponenttien avulla saatiin mallinnettua halutut ilmiöt Magnet- ja Thermal-simulointia varten. Esimerkiksi simulointimallista jätettiin pois virtakiskoja tukeva puurakenne, koska se ei vaikuta magneettikentän muotoon. Puurakenteilla on vaikutus ainoastaan kappaleiden ympärillä ilman virtaukseen. Ne sijaitsivat kuitenkin suhteellisen kaukana lämpötilan mittaustureista, joten niiden vaikutus mittaustuloksiin voitiin pitää mitättömänä. Yleisesti simulointiin sisällytetään ympäristöstä vain ne kappaleet, joilla on merkitystä tulosten kannalta. Kokemuksen mukaan tästä ääriesimerkinä on betonilattian vaikutus häviöihin ja siten myös jännitteenalenukseen. Jos koejärjestelyn kiskoston vaiheet olisivat olleet vaakasuuntaan rivissä lattian raudoituksella olisi todennäköisesti ollut merkittävä vaikutus magneettikentän muotoon ja sen myötä häviöihin. Tämän työn kokeissa vaihekiskot olivat pystyrivissä, joten lattia voitiin kokemuksen

mukaan jättää huomioimatta. Virtakiskojen ja tutkittavien kappaleiden geometria luotiin liitteessä 1 esitettyjen mittojen mukaisesti. Kiskojen syöttökaapelit yksinkertaistettiin suorakulmaisiksi särmiöiksi, joiden sijainti arvioitiin valokuvien perusteella. Niiden vaikutus mittaustuloksiin oli kuitenkin melko pieni, koska kaapelit sijaitsivat kaukana mitausantureista.

6.3 Testikappaleiden määrittelyt

Mallinnusprosessissa kuvattujen vaiheiden ja asetusten lisäksi testikappaleisiin määritettiin pintaimpedanssi sekä kokemusperäisesti riittävän tarkka verkotus. Simulointimallin materiaaleissa käytettiin liitteen 2 mukaisia materiaaliominaisuuksia.

6.3.1 Pintaimpedanssi

Magneettisen teräksen tunkeutumissyvyys on pieni ja siksi häviöiden tarkka laskeminen lähellä pintaa edellyttää tiheää verkkoa, joka kuluttaa paljon muistia ja laskenta-aikaa. Tämän ongelman välttämiseksi ohjelmassa on olemassa pintaimpedanssiin perustuva menetelmä, jossa magneettikenttä ja sen aiheuttamat häviöt lasketaan vain pinnoilla siihen kohdistuvan kentän perusteella. Pintaimpedanssilla kappaleiden sisälle ei määritellä verkkoa lainkaan. Tämä nopeuttaa laskentaa dramaattisesti sekä antaa tarkempia tuloksia kuin, mitä huomattavan tiheällä verkolla voidaan saavuttaa. Vaatimuksena pintaimpedanssimenetelmän käytölle on, että kappaleen paksuuden pitää olla monta kertaa suurempi kuin tunkeutumissyvyys. Tästä seuraa, että sitä ei voida käyttää materiaaleilla, joiden suhteellinen permeabiliteetti on pieni. Tässä työssä pintaimpedanssia käytettiin kaikissa testikappaleiden magneettisissa osissa.

6.3.2 Verkotus

Kappaleiden verkkoa määritettäessä otetaan huomioon komponenttien fyysinen koko. Isot yksinkertaiset komponentit voidaan yleensä analysoida melko harvalle verkolla, mikäli niiden alueella ei tapahdu magneettikentässä suuria muutoksia. Sen sijaan pieniä yksityiskohtia sisältävissä malleissa tarvitaan tiheämpää verkkoa. Työn mittausjärjestelyt

olivat fyysiseltä kooltaan muuntajille tyypillisiä, mutta tavanomaista yksinkertaisempia. Nämä huomioiden määritettiin kokemusperäisesti simulointimallin osille taulukon 7 mukainen verkotus.

Taulukko 7. Simulointimallin verkotuksen koko.

Komponentin nimi	Verkon maksimikoko (mm)	Särmien verkotus (mm)
Ilmalaatikko	100	-
Kiskosto	30	-
Testikappale	50	10–20

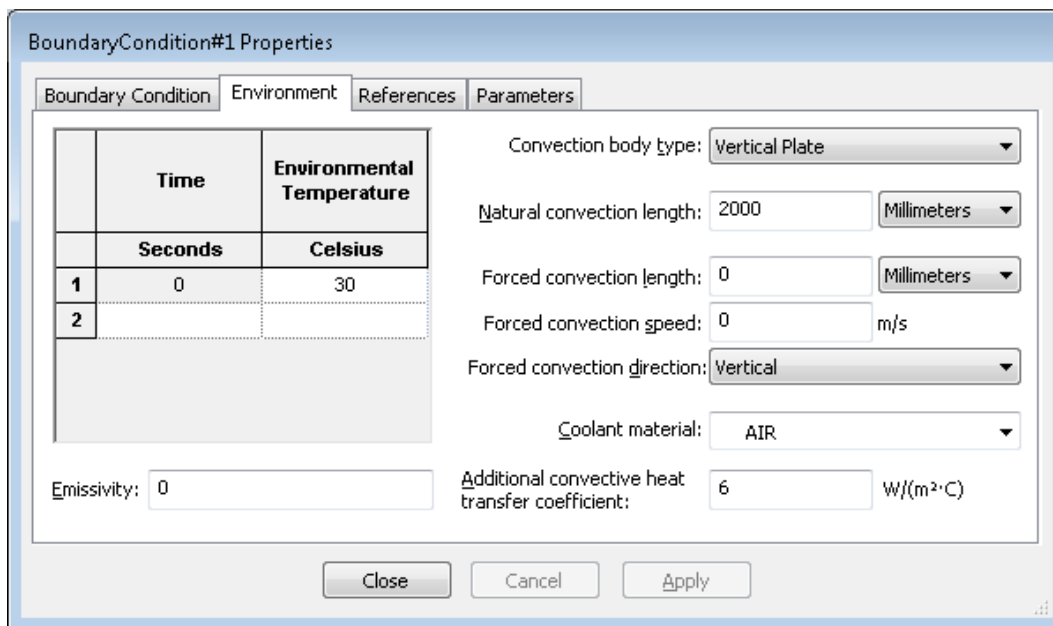
Testikappaleen särmille määritettiin tiheämpi verkko riippuen siitä, miten lähelle reunaa ensimmäinen mittausanturi oli mittauksissa asennettu. Lisäksi kupari- ja alumiinilevyjen ulkopinnoille asetettiin verkonkooksi 4 mm. Asetettu verkon koko määrittää verkon elementin suurimman koon, sillä käytännössä verkotus toteutuu geometriasta riippuen tiheämpänä.

6.4 Simulointimallista puuttuvat ilmiöt ja ominaisuudet

Yhtenä tämän työn simulointien lähtökohtana oli selvittää käytössä olleen simulointiruutiin tarjoamien tulosten luotettavuus. Monien ilmiöiden kohdalta olisi ollut mahdollista päästä sekä teoriassa että käytännössä tarkempaan lopputulokseen, mutta silloin jo vuosia käytössä olleesta menettelystä ei olisi saatu kattavaa luotettavuustietoa. Selvimmin tämä näkyy säteilyn vaikutuksen pois jättämisenä. Muita ilmiöitä, jotka jätettiin simulointimallin ulkopuolelle joko ohjelman rajallisuudesta johtuen tai edellä kuvatusta syystä, ovat syöttövirran aaltomuoto, virtausdynamiikka ja materiaalien ominaisuuksien lämpötilariippuvuus. Viimeksi mainittu on mahdollista huomioida syöttämällä materiaalien ominaisuudet useammassa eri lämpötilassa, jolloin ohjelma interpoloi niiden arvot kappaleelle lasketussa lämpötilassa. Tämä edellyttää, että ratkaisu iteroidaan useampaan kertaan halutun tarkkuuden saavuttamiseksi. Useammalla iterointikierroksella on merkittävä vaikutus laskenta-aikaan – mutta tämän työn tuloksiin suhteellisen pieni –

minkä vuoksi lasketun lämpötilan vaikutusta materiaalien ominaisuuksiin ei otettu huomioon. Syöttövirran oletettiin olevan enimmäkseen sinimuotoista – ilman merkittävää yliaaltopitoisuutta, mikä vaikuttaisi tuloksiin.

Sen sijaan tuloksien kannalta merkittävin tekijä, joka puuttuu simuloinnista, on virtausnopeuden vaikutus konvektioon. Käytännössä virtauksen vaikutus on pyritty huomioimaan määrittämällä kokemusperäisesti lämmönluovutuskertoimet ottaen huomioon jäähdyttävä aine ja pinnan asennon. Esimerkiksi hyvin jäähtyville ilmajäähdytteisille pystysuorille pinnoille kertoimeksi on määritetty $8\text{--}10\text{ W/m}^2\text{C}$ ja huonommin jäähtyville vaakasuorille pinnoille $4\text{--}5\text{ W/m}^2\text{C}$ (ABB 2008:32). Myöhempien versiopäivitysten yhteydessä Thermal on saanut toiminnallisuuden, jonka avulla voidaan laskea pinnoille lämmönluovutuskertoimet syötettyjen tietojen perusteella. Lämmönluovutuskertoimen laskemiseksi jäähdyttävään aineeseen määritetään dynaaminen viskositeetti [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$], joka kuvaa virtausvastusta. Mitä pienempi viskositeetti on sitä nopeamman jäähdyttävä aine virtaa ja näin ollen jäähdyttää tehokkaammin. Tällä on merkittävä vaikutus konvektion voimakkuuteen. Liitteen 2 taulukossa 10 on esitetty ilmalla käytetty dynaaminen viskositeetti. Kuvassa 12 on määritelty asetukset konvektion laskemiseen ilmajäähdytteiselle pystysuoralle pinnalle.



Kuva 12. Konvektion määrittelyikkuna.

6.5 Tuloksen tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä

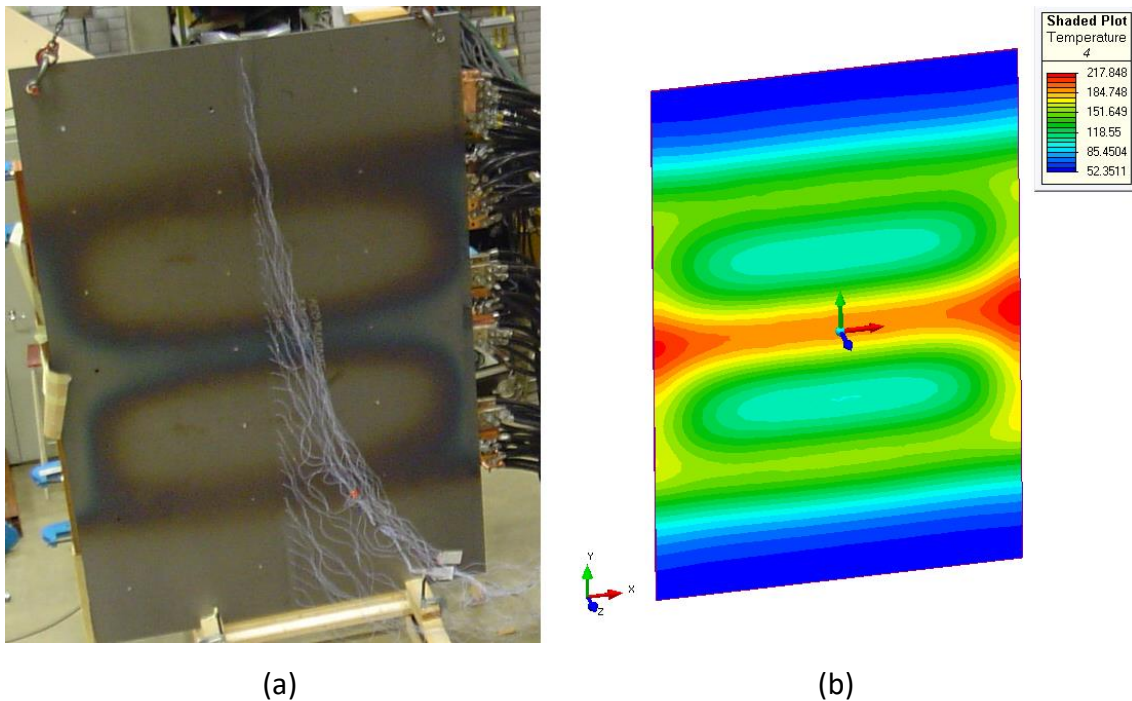
Simulointituloksen tarkkuus riippuu hyvin monesta tekijästä. Mallissa ja simuloinnissa pitää olla oikein määritellyn geometrian lisäksi sopivasti määritellyt lähteet, rajapintamääritykset, verkotus ja muut laskenta-asetukset. Simuloinnissa saattaa syntyä virheketjuja, jotka toisissa tilanteissa kumoavat toisensa ja siksi virheet saattavat jäädä huomaamatta. Esimerkiksi materiaalin permeabiliteetin virheellinen määrittäminen johtaa virheelliseen kentän arvoon. Tämän seurauksena myös häviöt lasketaan väärin. Mikäli on tiedossa oikea lämpötila, niin sen perusteella tulee helposti muodostettua virheellinen kuva lämmönjohtuvuudesta tai lämmönluovutuskertoimesta. Kun näitä opittuja parametreja käytetään luvun 7 simuloinnissa, missä vuontiheys on selvästi eri suuri, saadaan täysin vääriä lämpötiloja. Tällaisten virheellisten päättelyketjujen välttämiseksi on välttämätöntä vakioida käytetyt parametrit ja varmistaa niiden toimivuus usealla erilaisella simulointitapauksella. Toisaalta, jos mallia ei luoda ohjelmallisesti, on tärkeää, että simulointia suoritetaan niin usein, että hyvät käytännöt eivät pääse unohtumaan.

7 Simulointitulokset

Tässä luvussa on esitetty luvun 4 taulukoissa 3 ja 4 listattujen testien simulointitulokset, joita siis verrataan aiemmin mitattuihin lämpötiloihin. Poikkeuksena tähän ovat mittaukset D7–D12, joissa tutkittiin muuntajan puristuspalkin lämpötiloja. Näiden mittausten anturien numerointi ja niiden tarkat sijaintitiedot ovat jääneet dokumentoimatta, joten niiden tulosten analysoiminen osoittautui mahdottomaksi. Simulointitulosten avulla yritettiin määrittää, missä anturit ovat sijainneet, siinä kuitenkaan onnistumatta.

7.1 Suojaamaton magneettinen teräslevy

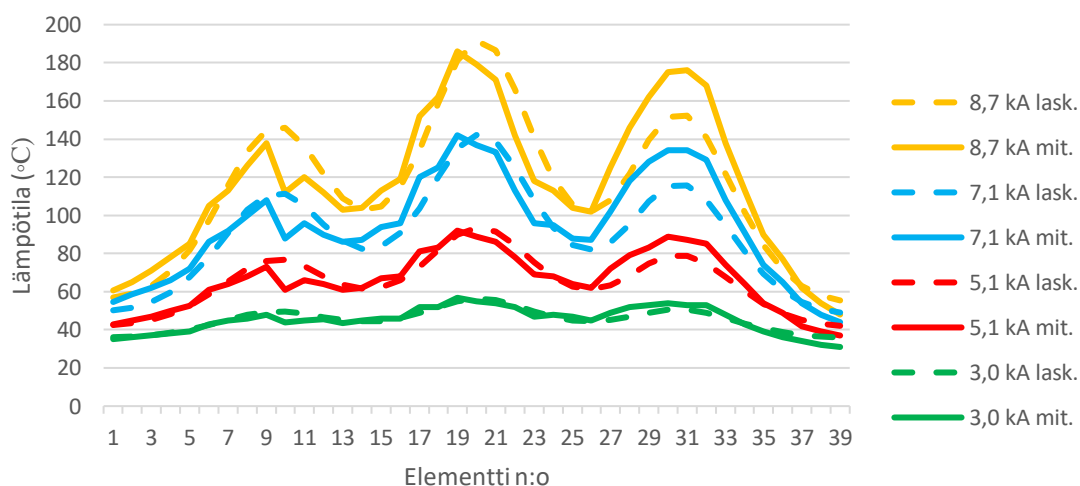
Vuonna 2005 suoritettujen mittausten aikana ei ollut käytössä laadukasta lämpökameraa. Kuvassa 13 on kuitenkin esitetty levystä otettu valokuva, jossa näkyy selvästi eniten lämmenneet alueet, joiden väri on muuttunut lämmön vaikutuksesta. Vertaamalla valokuvaa simulointiohjelman lämpökuvaan niissä voi nähdä samanlaisuutta.



Kuva 13. Suojaamattoman levyn värinmuutos (a) sekä simuloitu lämmönjakauma (b).

7.1.1 Virran suuruuden vaikutus magneettisen teräslevyn lämpötiloihin

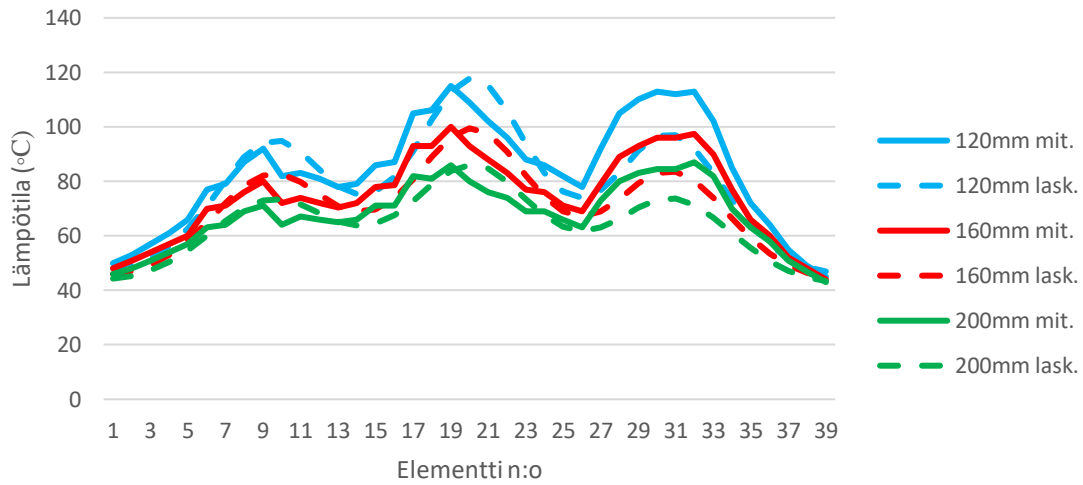
Testissä 1 tutkittiin testikappaleella 1 magneettisen teräslevyn paikallisia lämpötiloja neljällä erisuuruisella sähkövirralla (3; 5,1; 7,1 ja 8,7 kA). Kuvan 14 kaaviossa on esitetty teräslevyn keskilinjalta mitatut ja lasketut lämpötilat liitteen 1 mukaisissa kohdissa. Lämpötila-anturi 1 oli levyn yläreunassa ja vastaavasti 39 oli levyn alareunassa. Kuvassa on ilmoitettu keskimmäisen vaiheen sähkövirta. Ylimmässä ja alimmassa vaiheessa sähkövirrat olivat pienemmät, kuten luvussa 6 selvitetään. Suojaamattomalle teräslevylle lasketut ja mitatut lämpötilat osuvat varsin hyvin lähelle toisiaan. Konvektiokertoimeksi oli määritetty $9 \text{ W/m}^2\text{C}$, joka näyttää sopivalle kahden ylemmän vaiheen kohdalla. Sen sijaan alimman vaiheen kohdalla sen pitäisi olla pienempi hitaamman ilman virtauksen vuoksi.



Kuva 14. Testi 1: Suojaamattoman teräslevyn elementeillä 1–39 mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 3; 5,1; 7,1 ja 8,7 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.

7.1.2 Virran etäisyyden vaikutus magneettisen teräslevyn lämpötiloihin

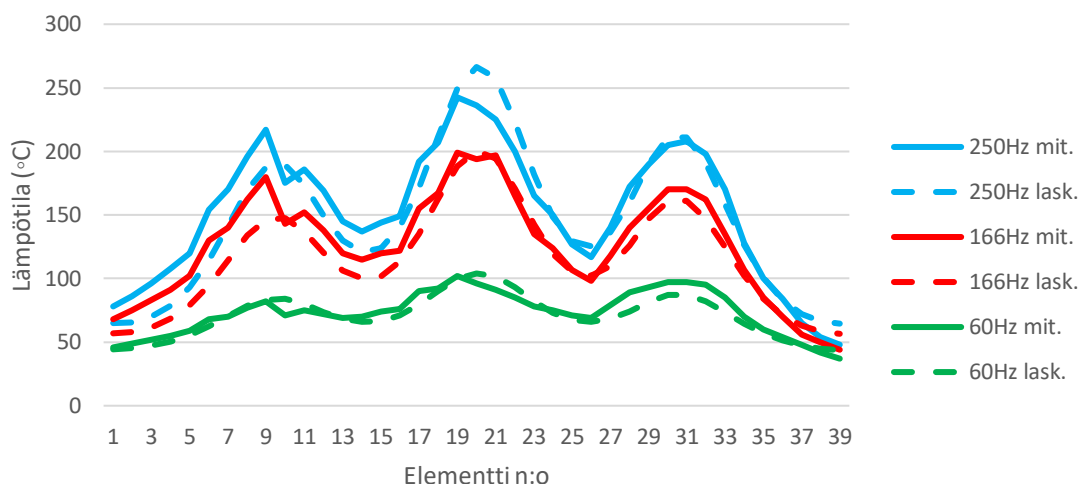
Testissä 2 tutkittiin kiskojen ja testikappaleen välisen etäisyyden vaikutusta lämpötiloihin testikappaleella 1. Kuvassa 15 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, 7 kA sähkövirralla ja 50 Hz taajuudella.



Kuva 15. Testi 2: Suojaamattoman teräslevyn elementeillä 1–39 mitatut ja lasketut lämpötilat 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun keskimmäisen vaiheen virta on 7 kA ja taajuus on 50 Hz.

7.1.3 Taajuuden vaikutus magneettisen teräslevyn lämpötiloihin

Testissä 3 selvitettiin sähkövirran taajuuden vaikutusta testikappaleen 1 lämpötiloihin. Kuvassa 16 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla 7 kA sähkövirralla ja 80 mm etäisyydellä.



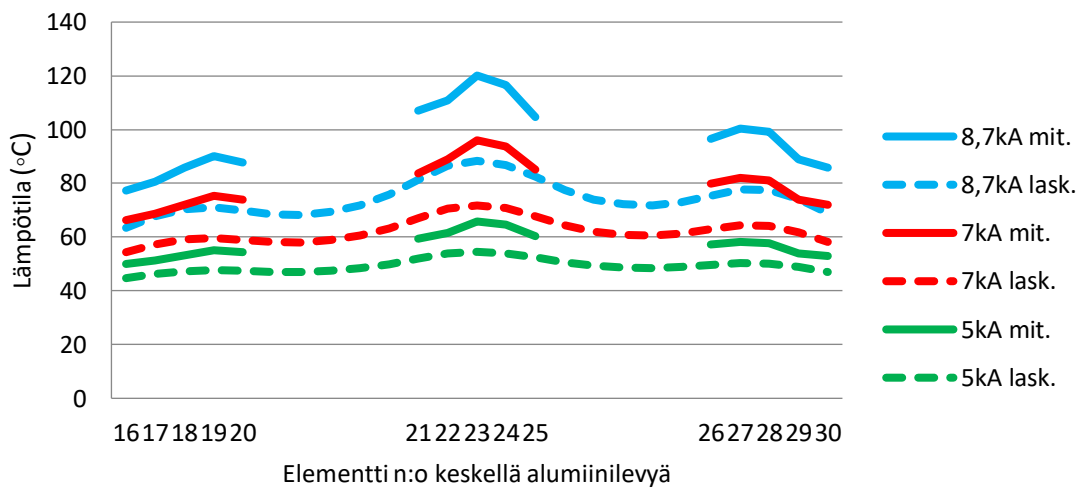
Kuva 16. Testi 3: Suojaamattoman teräslevyn elementeillä 1–39 mitatut ja lasketut lämpötilat 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun keskimmäisen vaiheen virta on 5 kA ja etäisyys on 80 mm.

7.2 Alumiinilla suojattu magneettinen teräslevy

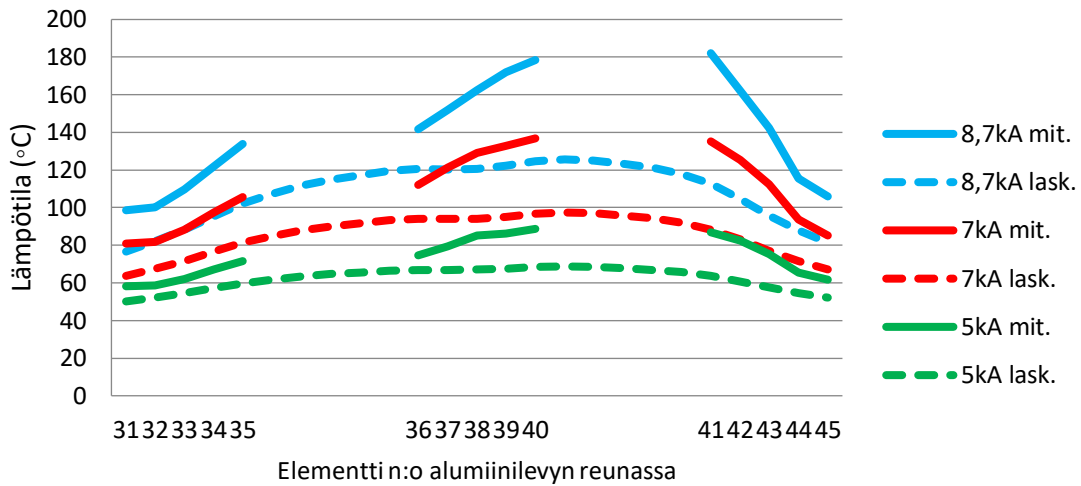
Testeissä 4–6 tutkittiin alumiinin kykyä suojata magneetista teräslevyä lämpenemältä testikappaleella 2, jossa teräslevyn päällä oli 6 mm paksuinen alumiinilevy. Levyn reunaan oli jätetty 300 mm leveä suojaamaton alue. Tämän avulla voitiin tutkia myös suoja-levyn reunassa syntyä ilmiöitä monipuolisemmin. Testissä alumiinilevy oli eristetty teräslevystä 2 mm prespaanilevyllä, mikä on öljyeristeisessä muuntajassa tyypillinen ratkaisu kipinöinnin ja kaasuuntumisen estämiseksi. Prespaanilevy toimii myös lämpöeristeenä levyjen välissä. Lämpöeristys levyjen välissä on yksi merkittävä ero alumiini- ja kuparisuojauksien välillä. Kuparisuojauksessa kuparilevy levittää magneettisessa teräslevyssä syntyvää lämpöä isommalle alueelle. Alumiinilla tätä vaikutusta ei juurikaan ole prespaanilevyn lämmöneristyskyvyn vuoksi. Magneettivuon osuessa alumiinilevyyn siihen syntyy vuon suuntaa vastaan kulkeva virta, joka pienentää teräkseen kohdistuvaa magneettivuota. Vuon pienenemisen myötä teräksessä syntyvät pyörrevirtahäviöt laskevat ja siten myös levyn lämpötilat pienenevät.

7.2.1 Virran suuruuden vaikutus lämpötiloihin alumiinisuojoilla

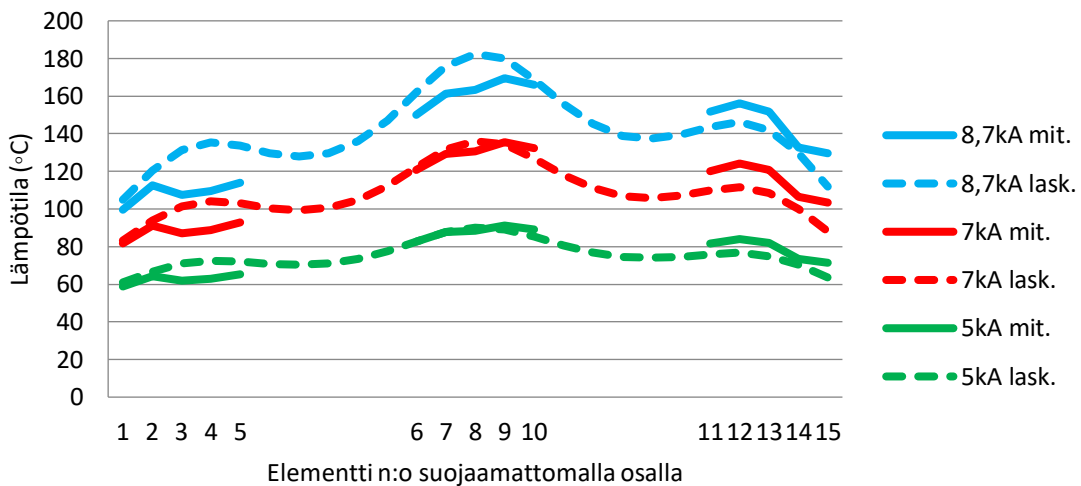
Testissä 4 tutkittiin sähkövirran suuruuden vaikutusta alumiinilevyllä suojatun magneettisen teräslevyn lämpötiloihin testikappaleella 2. Samalla tutkittiin myös alumiinilevyn lämpötiloja, jotka kokemuksen mukaan voivat olla yllättävän korkeita erityisesti levyn reunoissa. Kuvissa 17–19 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat 5; 7 ja 8,7 kA virroilla. Kuvassa 17 on esitetty lämpötilat alumiinilevyn keskellä ja kuvassa 18 on esitetty lämpötilat alumiinilevyn reunassa. Kuvassa 19 on esitetty lämpötilat teräslevyn suojaamattomassa osassa.



Kuva 17. Testi 4: Alumiinisuojan keskeltä elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 5; 7 ja 8,7 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.



Kuva 18. Testi 4: Alumiinilla suojan reunasta elementeillä 31–45 mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 5; 7 ja 8,7 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.

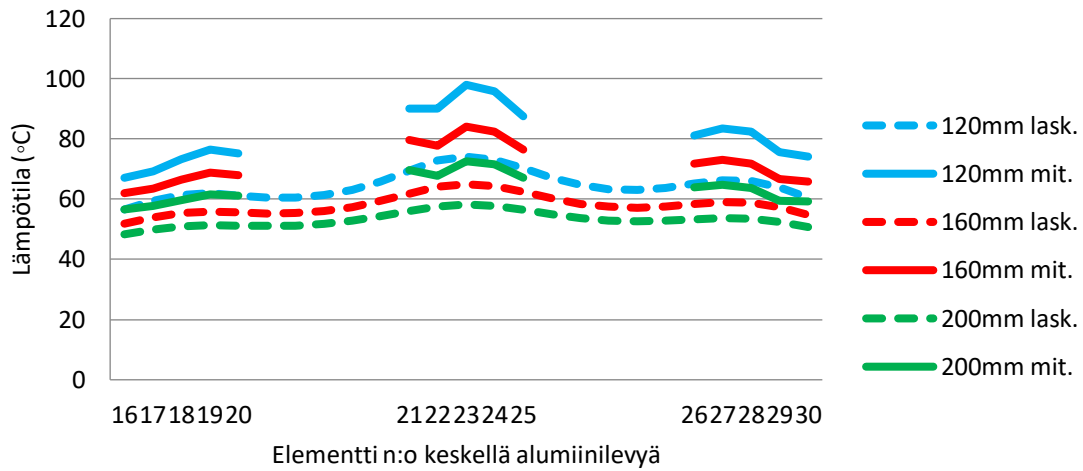


Kuva 19. Testi 4: Suojaamattomasta osasta elementeillä 1–15 mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 5; 7 ja 8,7 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.

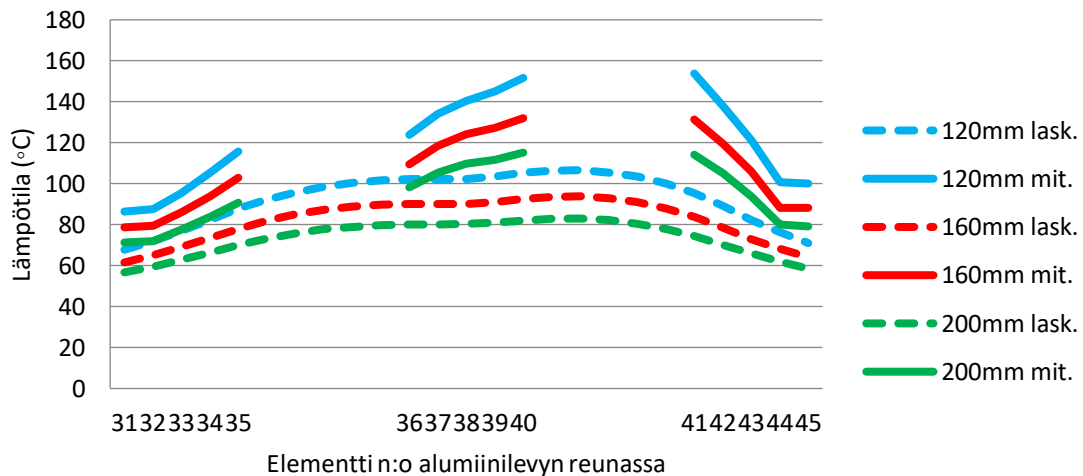
7.2.2 Virran etäisyyden vaikutus lämpötiloihin alumiinisuojoilla

Testissä 5 tutkittiin virtakiskojen etäisyyden vaikutusta alumiinilevyllä suojatun magneettisen teräslevyn lämpötiloihin testikappaleella 2. Samalla tutkittiin myös lämpötiloja alumiinilevyn keskellä ja sen reunassa. Kuvissa 20–22 on esitetty mitatut ja lasketut

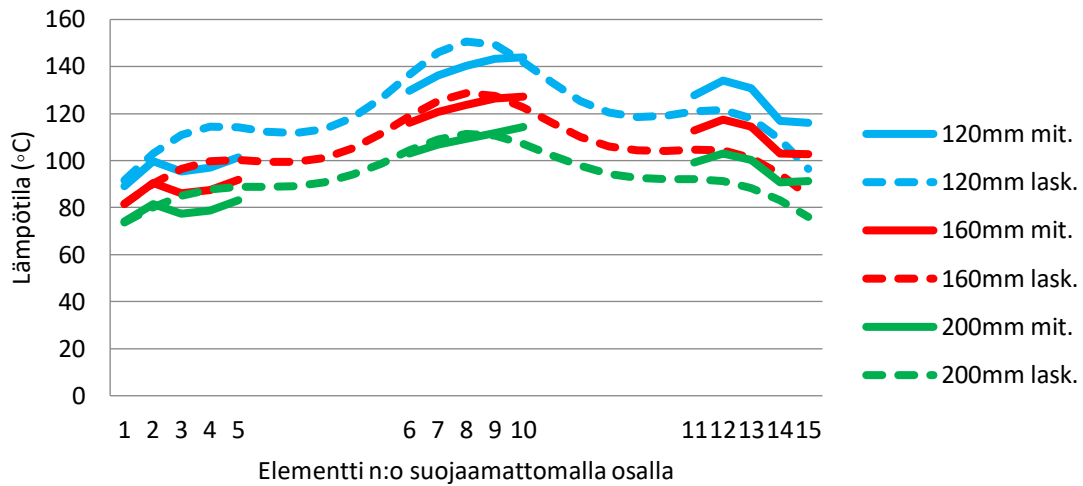
lämpötilat 120, 160 ja 200 mm kiskojen ja testikappaleen välisillä etäisyyksillä. Kuvassa 20 on esitetty lämpötilat alumiinilevyn keskellä ja kuvassa 21 on esitetty lämpötilat alumiinilevyn reunassa. Kuvassa 22 on esitetty lämpötilat teräslevyn suojaamattomassa osassa.



Kuva 20. Testi 5: Alumiinisuojan keskeltä elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun keskimmäisen vaiheen virta on 7 kA ja taajuus on 50 Hz.



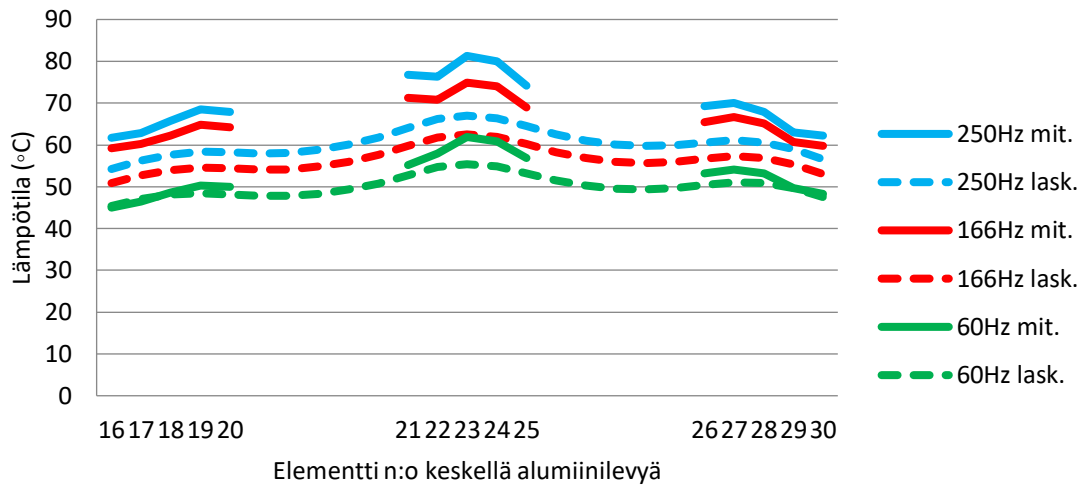
Kuva 21. Testi 5: Alumiinisuojan reunasta elementeillä 31–45 mitatut ja lasketut lämpötilat 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun keskimmäisen vaiheen virta on 7 kA ja taajuus on 50 Hz.



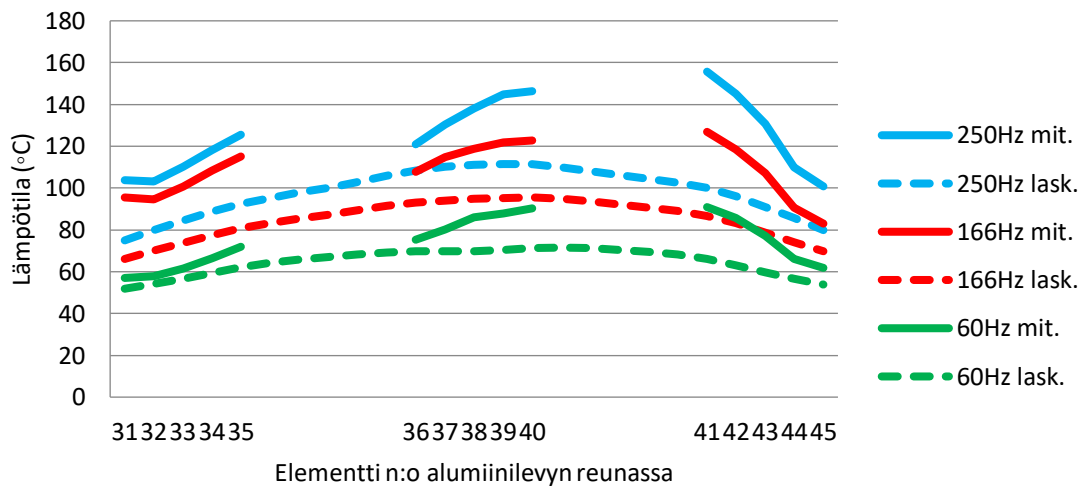
Kuva 22. Testi 5: Suojaamattomasta osasta elementeillä 1–15 mitatut ja lasketut lämpötilat 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun keskimmäisen vaiheen virta on 7 kA ja taajuus on 50 Hz.

7.2.3 Taajuuden vaikutus lämpötiloihin alumiinisuojoilla

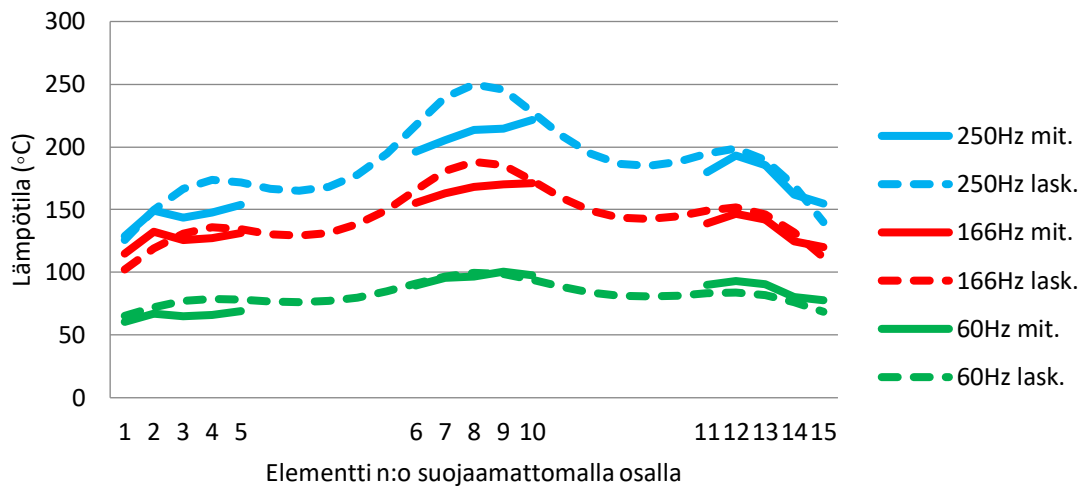
Testissä 6 tutkittiin virran taajuuden vaikutusta alumiinilevyllä suojatun magneettisen teräslevyn lämpötiloihin testikappaleella 2. Samalla tutkittiin myös lämpenemiä alumiinilevyn keskeltä ja sen reunasta. Kuvissa 23–25 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat kolmella eri taajuudella 60, 166 ja 250 Hz. Kuvassa 23 on esitetty lämpötilat alumiinilevyn keskellä ja kuvassa 24 alumiinilevyn reunassa. Kuvassa 25 on esitetty lämpötilat teräslevyn suojaamattomasta osasta.



Kuva 23. Testi 6: Alumiinisuojan keskeltä elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun keskimmäisen vaiheen virta on 5 kA ja etäisyys on 80 mm.



Kuva 24. Testi 6: Alumiinisuojan reunasta elementeillä 31–45 mitatut ja lasketut lämpötilat 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun keskimmäisen vaiheen virta on 5 kA ja etäisyys on 80 mm.



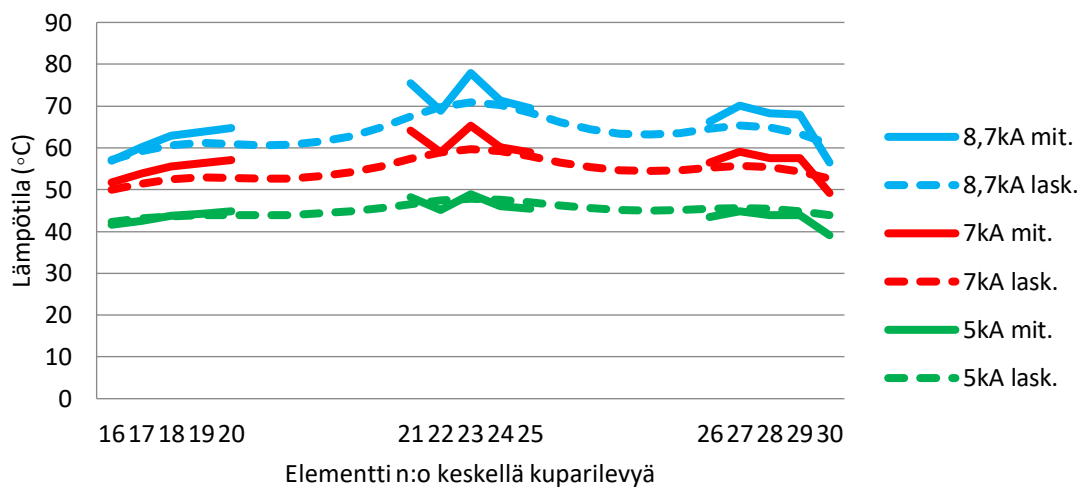
Kuva 25. Testi 6: Suojaamattomasta osasta elementeillä 1–15 mitatut ja lasketut lämpötilat 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun keskimmäisen vaiheen virta on 5 kA ja etäisyys on 80 mm.

7.3 Kuparilla suojattu magneettinen teräslevy

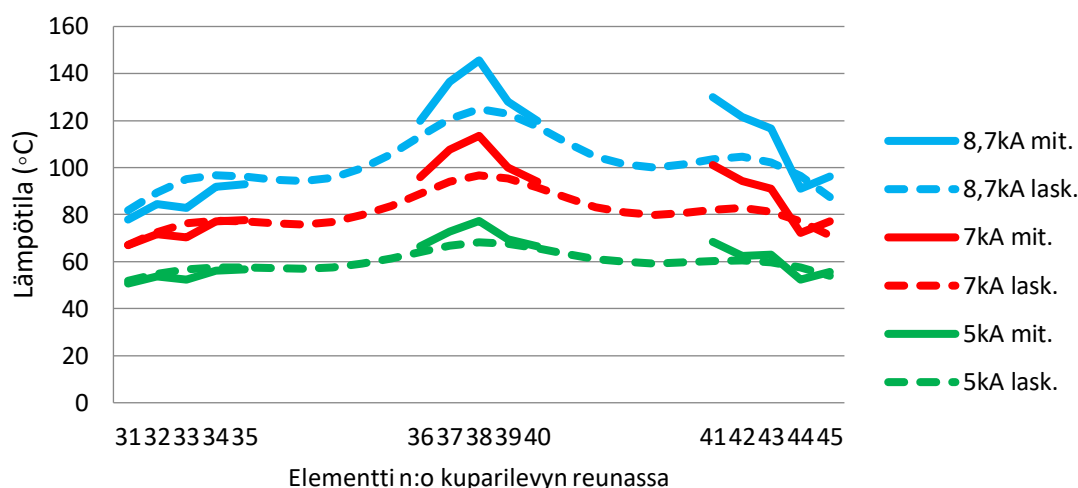
Testeissä 7–9 tutkittiin kuparin kykyä suojata magneettista teräslevyä lämpenemältä testikappaleella 3, jossa teräslevyn päällä oli 4 mm paksuinen kuparilevy. Levyn reunaan oli jätetty alumiinisuojan tavoin 300 mm leveä suojaamaton alue. Tämän avulla voitiin tutkia levyn reunassa syntyviä ilmiöitä monipuolisemmin sekä verrata alumiinia ja kuparia toisiinsa. Magneettivuon osuessa kupariin siihen syntyy virta, jonka aiheuttama magneettivuoto on levyyn osuvaan kenttään nähden vastakkainen. Näin virtojen magneettivuot kompensoivat toisiaan. Tällä tavalla kupari pienentää sen takana olevan magneettisen teräslevyn pyörrevirtoja, minkä seurauksena myös tehohäviöt ja lämpötilat laskevat. Kuparilevy oli hitsattu paikoitellen teräslevvyyn kiinni, minkä ansiosta se alentaa kuumimpien kohtien lämpötilaa myös levittämällä lämpöä laajemmalle alueelle paremman lämmönjohtavuutensa ansiosta. Simulointimallissa levyjen välille tehtiin täydellinen termien ja galvaaninen kontakti, mikä ei todennäköisesti vastaa täysin käytännössä toteutunutta. Levyt hitsattiin yhteen vain paikoitellen, joten muilla alueilla levyjen välillä saattaa olla sähkövirran ja lämmönjohtumisen eristävä pieni ilmarako.

7.3.1 Virran suuruuden vaikutus lämpötiloihin kuparisuojalla

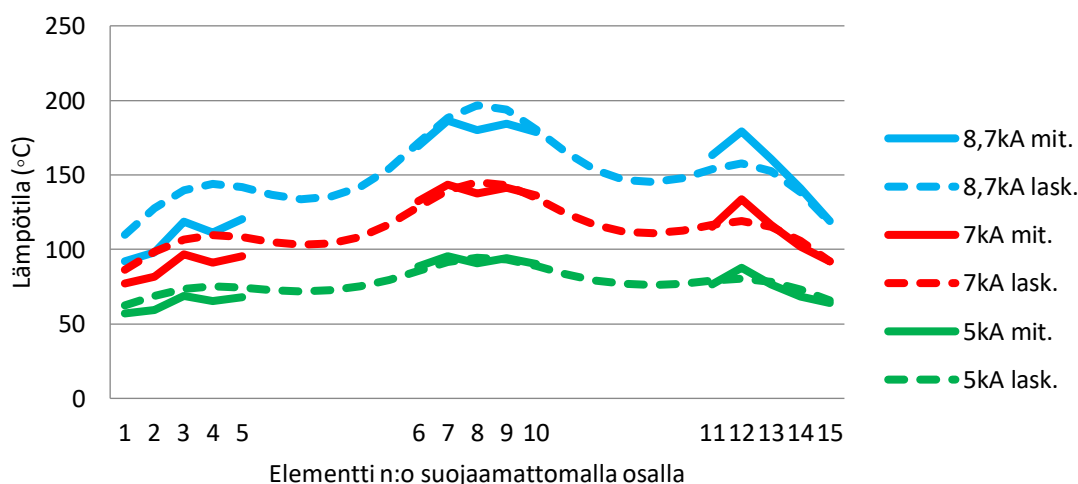
Testissä 7 tutkittiin sähkövirran suuruuden vaikutusta kuparilevyllä suojatun magneettisen teräslevyn lämpenemään. Samalla tutkittiin lämpötiloja myös kuparilevyn keskellä ja sen reunassa. Kuvissa 26–28 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat kolmella erisuuruisella virralla (5; 7 ja 8,7 kA). Kuvassa 26 on esitetty lämpötilat kuparilevyn keskellä ja kuvassa 27 on lämpötilat kuparilevyn reunassa. Kuvassa 28 on esitetty lämpötilat magneettisen teräslevyn suojaamattomalla osalla.



Kuva 26. Testi 7: Kuparisuojan keskeltä elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 3; 5,1; 7,1 ja 8,7 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.



Kuva 27. Testi 7: Kuparisuojan reunasta elementeillä 31–45 mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 3; 5,1; 7,1 ja 8,7 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.

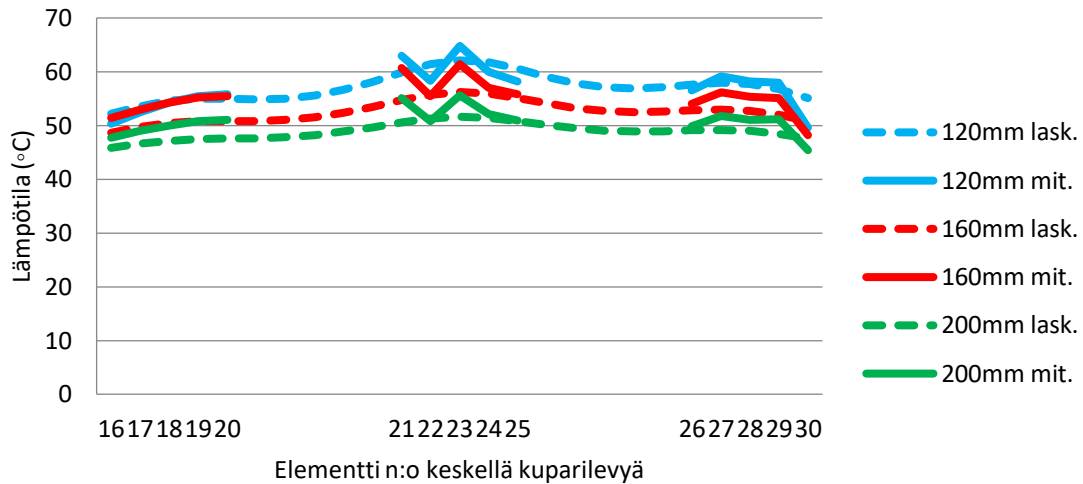


Kuva 28. Testi 7: Suojaamattomasta osasta elementeillä 1–15 mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 3; 5,1; 7,1 ja 8,7 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.

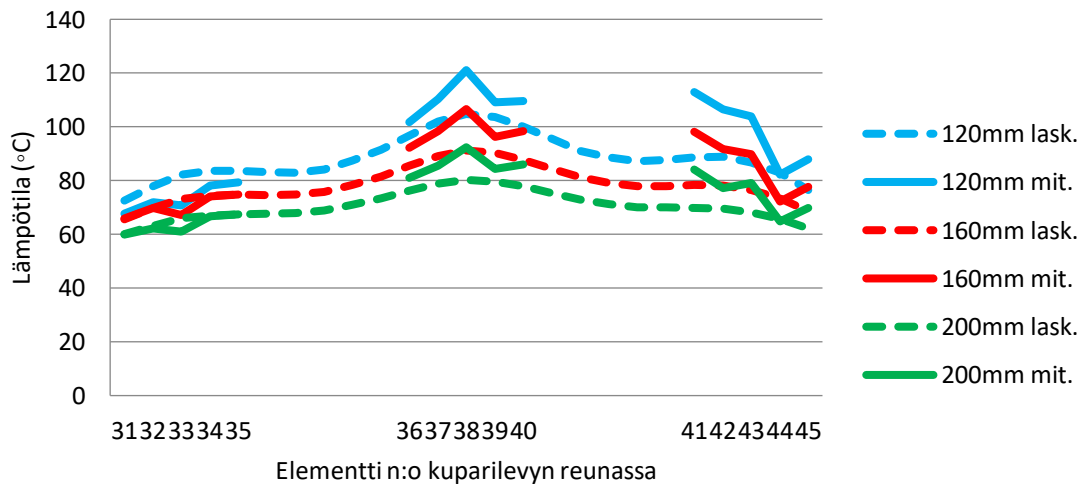
7.3.2 Virran etäisyyden vaikutus lämpötiloihin kuparisuojalla

Testissä 8 tutkittiin sähkövirran etäisyyden vaikutusta kuparilevyllä suojatun magneettisen teräslevyn lämpenemään. Samalla tutkittiin lämpötiloja myös kuparilevyn keskeltä ja sen reunasta. Kuvissa 29–31 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat kiskojen ja

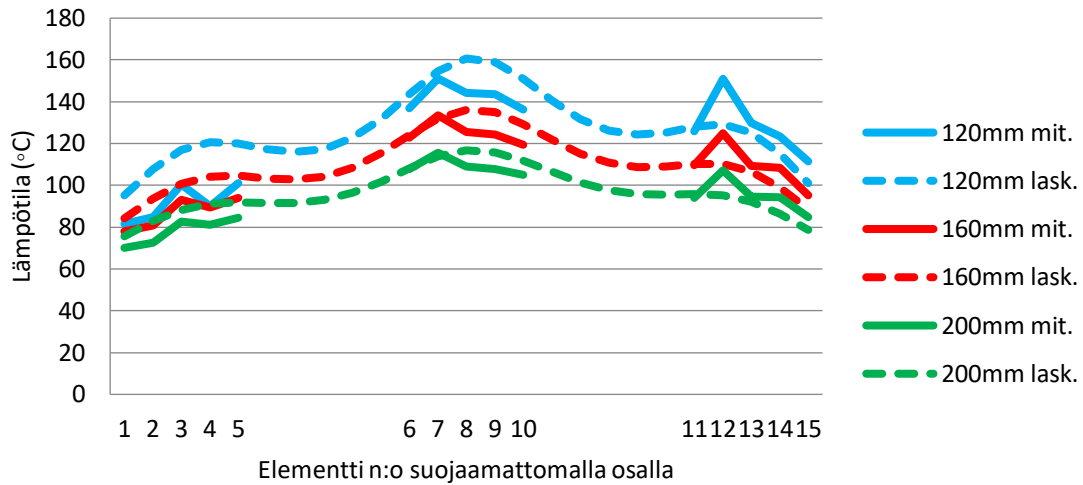
testikappaleen välisillä etäisyyksillä 120, 160 ja 200 mm. Kuvassa 29 on esitetty lämpötilat kuparilevyn keskellä. Kuvassa 30 on esitetty lämpötilat kuparilevyn reunassa ja kuvassa 31 magneettisen teräslevyn suojaamattomalla osalla.



Kuva 29. Testi 8: Kuparisuojan keskeltä elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun keskimmäisen vaiheen virta on 7 kA ja taajuus on 50 Hz.



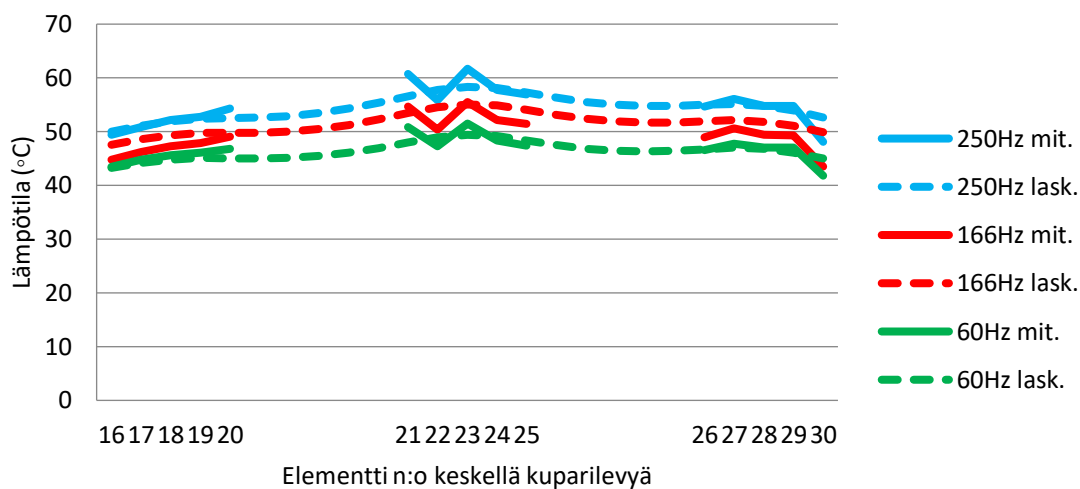
Kuva 30. Testi 8: Kuparisuojan reunasta elementeillä 31–45 mitatut ja lasketut lämpötilat 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun keskimmäisen vaiheen virta on 7 kA ja taajuus on 50 Hz.



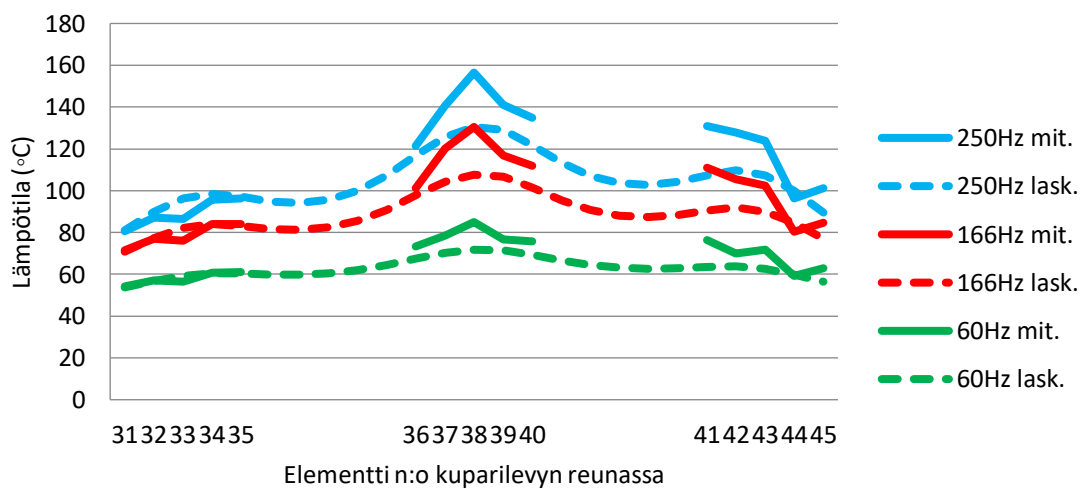
Kuva 31. Testi 8: Suojaamattomasta osasta elementeillä 1–15 mitatut ja lasketut lämpötilat 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun keskimmäisen vaiheen virta on 7 kA ja taajuus on 50 Hz.

7.3.3 Taajuuden vaikutus lämpötiloihin kuparisuojalla

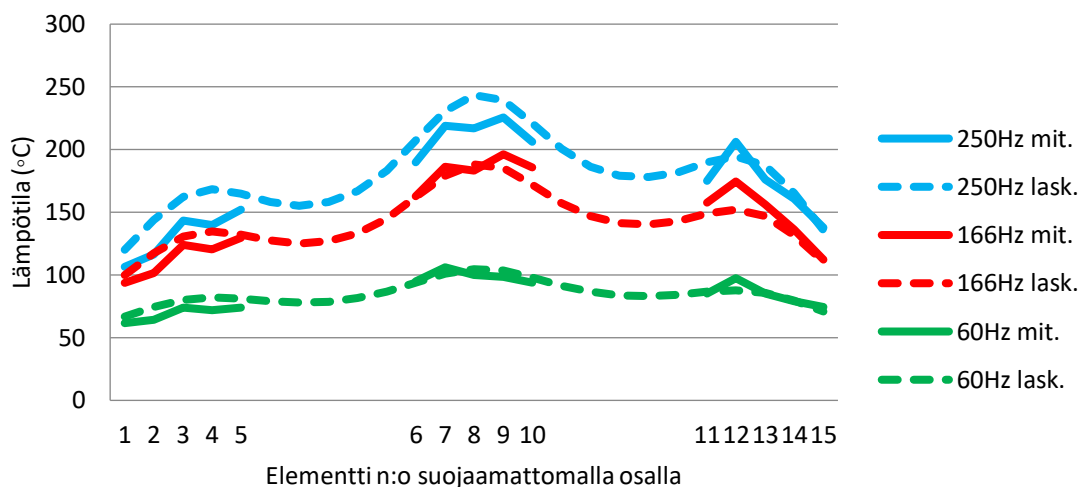
Testissä 9 tutkittiin virran taajuuden vaikutusta kuparilevyllä suojatun magneettisen teräslevyn lämpenemään. Samalla tutkittiin lämpötiloja myös kuparilevyn keskellä ja sen reunassa. Kuvissa 32–34 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla. Kuvassa 32 on esitetty lämpötilat alumiinilevyn keskellä ja kuvassa 33 on esitetty lämpötilat alumiinilevyn reunassa. Kuvassa 34 on esitetty lämpötilat magneettisen teräslevyn suojaamattomassa osassa.



Kuva 32. Testi 9: Kuparisuojan keskeltä elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun keskimmäisen vaiheen virta on 5 kA ja etäisyys on 80 mm.



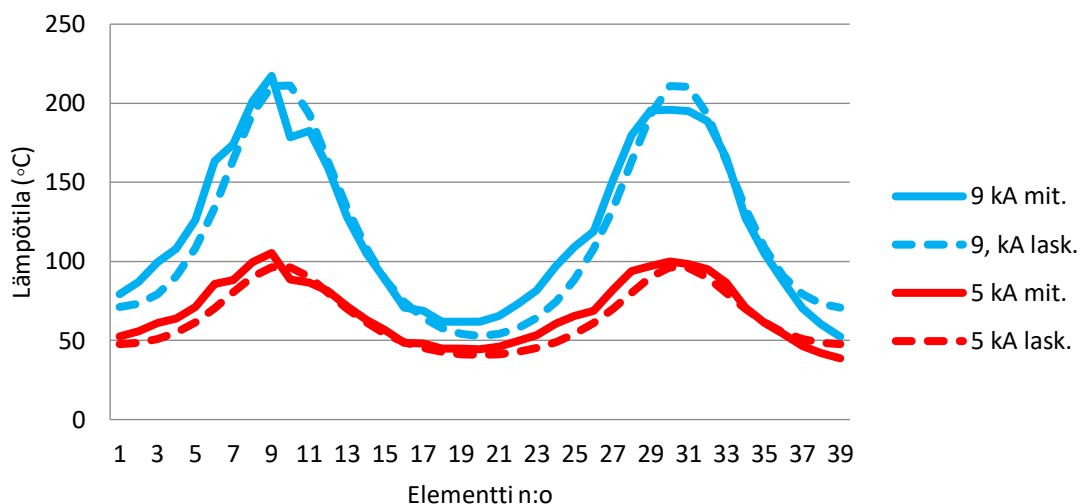
Kuva 33. Testi 9: Kuparisuojan reunasta elementeillä 31–45 mitatut ja lasketut lämpötilat 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun keskimmäisen vaiheen virta on 5 kA ja etäisyys on 80 mm.



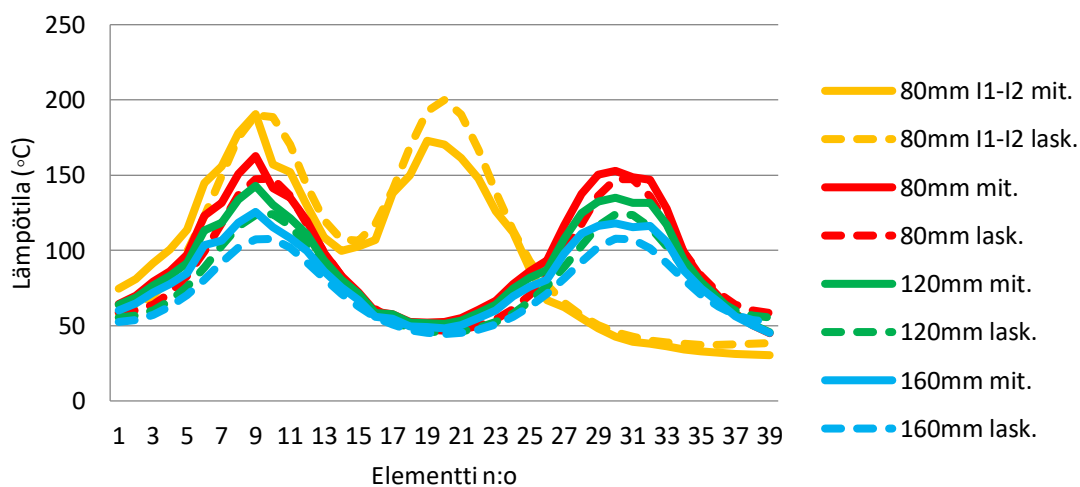
Kuva 34. Testi 9: Suojaamattomasta osasta elementeillä 1–15 mitatut ja lasketut lämpötilat 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun keskimmäisen vaiheen virta on 5 kA ja etäisyys on 80 mm.

7.4 Vaihe-etäisyyden vaikutus lämpötiloihin

Testeissä 10–12 tutkittiin yksivaiheisen virtakiskoston vaihe-etäisyyden vaikutusta lämpötiloihin testikappaleella 1. Testissä 10 tutkittiin lämpötiloja 80 mm testikappaleen ja kiskoston välisellä etäisyydellä 5 ja 9 kA vaihevirroilla, jotka kulkivat vastakkaisiin suuntiin 1600 mm etäisyydellä toisistaan ylimmässä ja alimmassa kiskonipussa. Testissä 11 tutkittiin lämpötiloja 80, 120 ja 160 mm kiskojen ja testikappaleen välisellä etäisyydellä 7 kA virralla 1600 mm kiskonippujen välisellä etäisyydellä. Testissä 12 tutkittiin lämpötiloja 9 kA virralla 800 mm kiskonippujen välisellä etäisyydellä, jotka kulkivat kahden ylimmän vaiheen kiskoissa vastakkaisiin suuntiin. Testissä virtakiskojen ja testikappaleen välinen etäisyys oli 80 mm. Kuvassa 35 on esitetty testissä 10 mitatut ja lasketut lämpötilat. Kuvassa 36 on esitetty testien 11 ja 12 mitatut ja lasketut lämpötilat.



Kuva 35. Testi 10: Magneettisen teräslevyn keskeltä elementeillä 1–39 mitatut ja lasketut lämpötilat 5 ja 9 kA virroilla, kun testikappaleen etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.



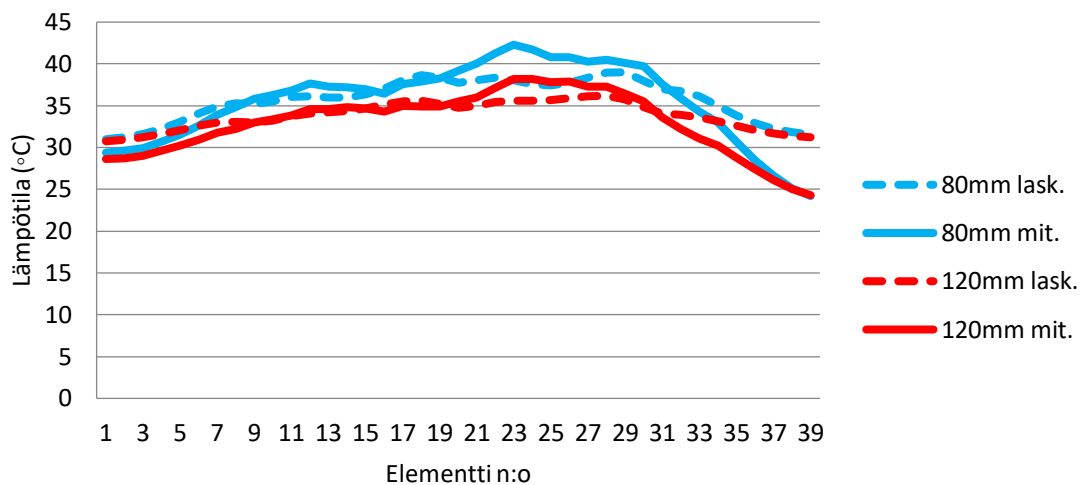
Kuva 36. Testit 11 ja 12: Magneettisen teräslevyn keskeltä elementeillä 1–39 mitatut ja lasketut lämpötilat 80, 120 ja 160 mm etäisyyksillä, kun taajuus on 50 Hz.

7.5 Virtojen kompensoinnin vaikutus lämpötiloihin

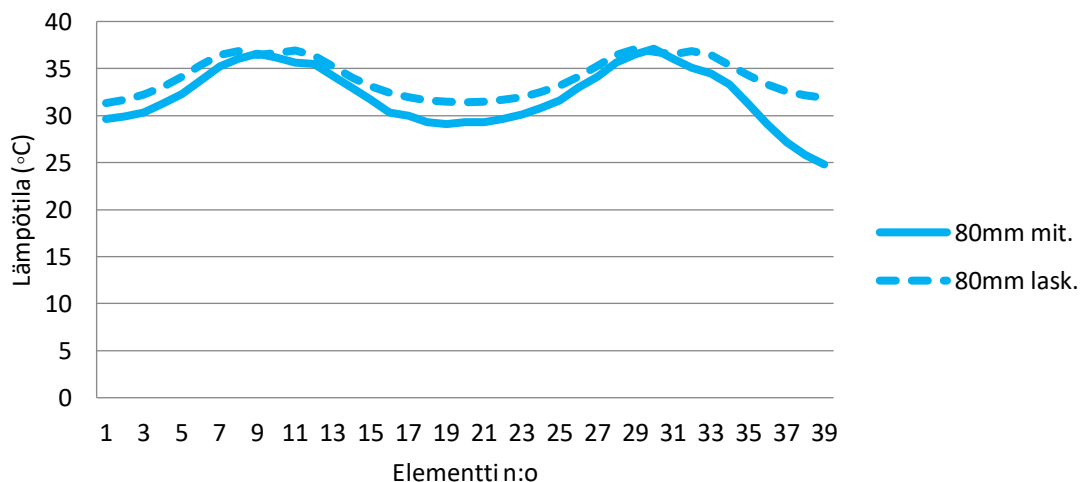
Testeissä 1–10 yhdellä vaiheella oli 2 kolmen kiskon nippua rinnakkain, jolloin eri vaihekulmaisten sähkövirtojen etäisyys toisistaan oli joko 800 tai 1600 mm. Näin iso virtojen keskinäinen etäisyys synnyttää ison hajakentän, jota tarvittiin korkeiden lämpötilojen aiheuttamiseen testikappaleissa. Testeissä 13–16, 19 ja 21 tutkittiin vaihevirran viereen vastakkaisvaiheisen virran lisäämisen vaikutusta lämpötiloihin. Näissä testeissä vaihevirta kulki kiskonipun kolmessa kiskossa toiseen suuntaan ja vierekkäisissä kolmessa kiskossa takaisin. Vastakkaisten kiskonippujen etäisyydeksi tuli 150 mm keskeltä keskelle mitattuna. Vastakkaisvaiheisten virtojen synnyttämät magneettivuot ovat toisiinsa nähden myös vastakkaiset ja ne kumoavat toisensa riittävän kaukaa tarkasteltuna. Tätä ilmiötä kutsutaan siis kompensoinniksi.

7.5.1 Magneettinen teräslevy kompensoiduilla virroilla

Testeissä 13 ja 14 tutkittiin kompensoitujen virtakiskostojen aiheuttamaa lämpenemää teräslevyyn testikappaleella 1. Kuvassa 37 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat kolmivaiheisella kiskostolla 800 mm vaihevälillä. Kuvassa 38 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat kaksivaiheisella kytkennällä 1600 mm vaihevälillä.



Kuva 37. Testi 13: Magneettisen teräslevyn keskeltä elementeillä 1–39 mitatut ja lasketut lämpötilat kolmivaiheisella kiskostolla vastakkaisilla 4,2 kA vaihevirralla 80 ja 120 mm etäisyydellä, kun taajuus on 50 Hz.

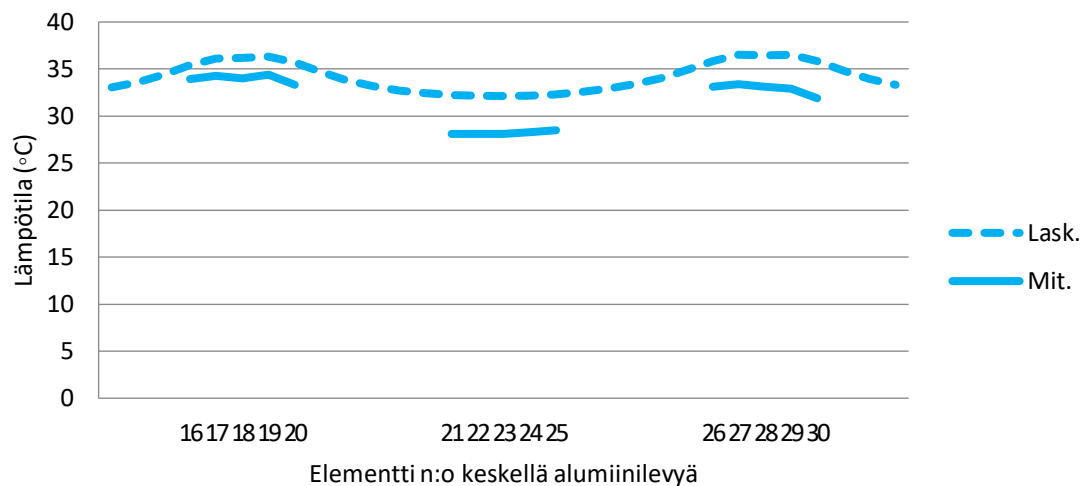


Kuva 38. Testi 14: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–39 mitatut ja lasketut lämpötilat kaksivaiheisella kytkennällä 4,2 kA virralla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.

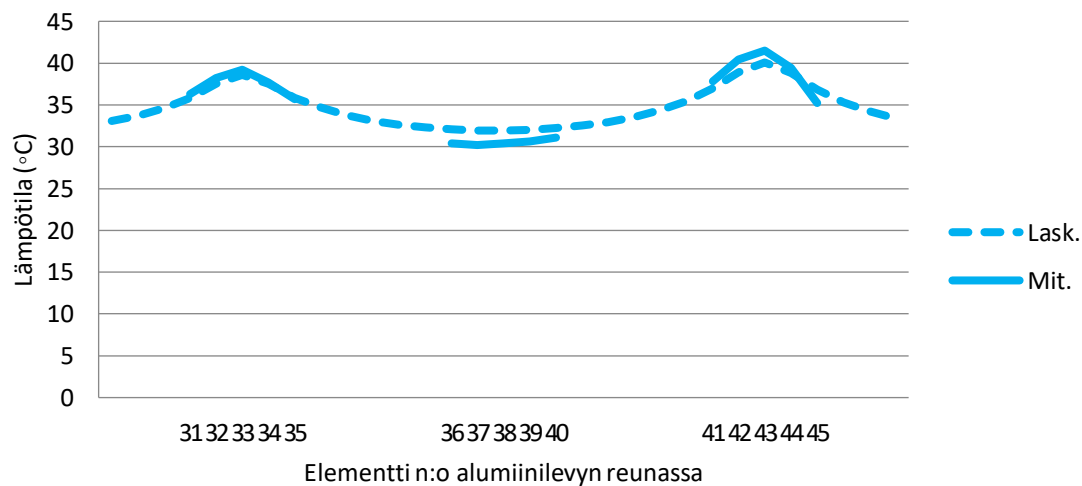
7.5.2 Alumiinilla suojattu magneettinen teräslevy kompensoiduilla virroilla

Testissä 15 tutkittiin alumiinin kykyä suojata magneettista teräslevyä kompensoitujen virtojen aiheuttamalta lämpenemältä testikappaleella 2. Kuvissa 39–41 on esitetty

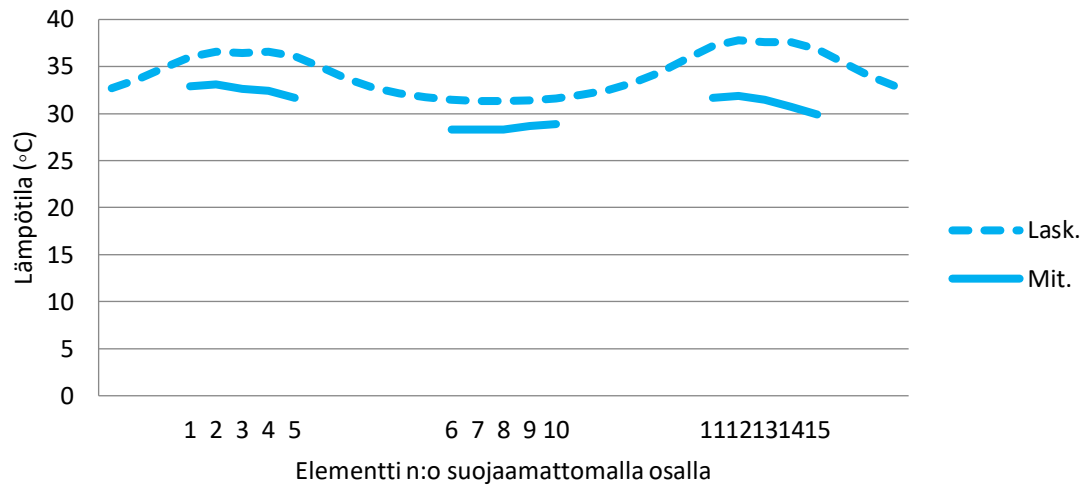
mitatut ja lasketut lämpötilat kaksivaiheisella kytkennällä 1600 mm vaihevälillä etäisyydellä. Kuvassa 39 on esitetty lämpötilat alumiinilevyn keskellä ja kuvassa 40 on esitetty lämpötilat alumiinilevyn reunassa. Kuvassa 41 on esitetty lämpötilat suojaamattomassa osassa.



Kuva 39. Testi 15: Alumiinisuojan keskeltä elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat vastakkaisilla 4,2 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.



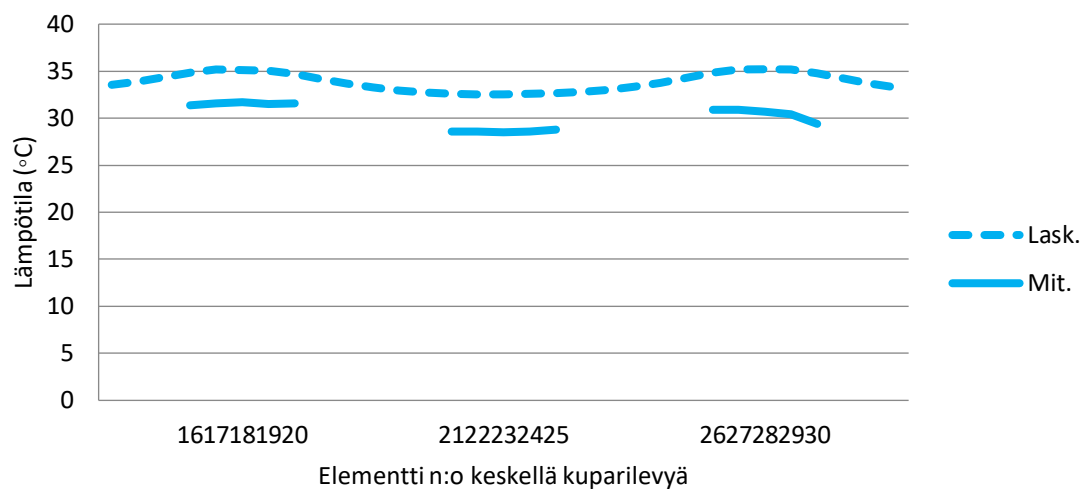
Kuva 40. Testi 15: Alumiinisuojan reunasta elementeillä 31–45 mitatut ja lasketut lämpötilat vastakkaisilla 4,2 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.



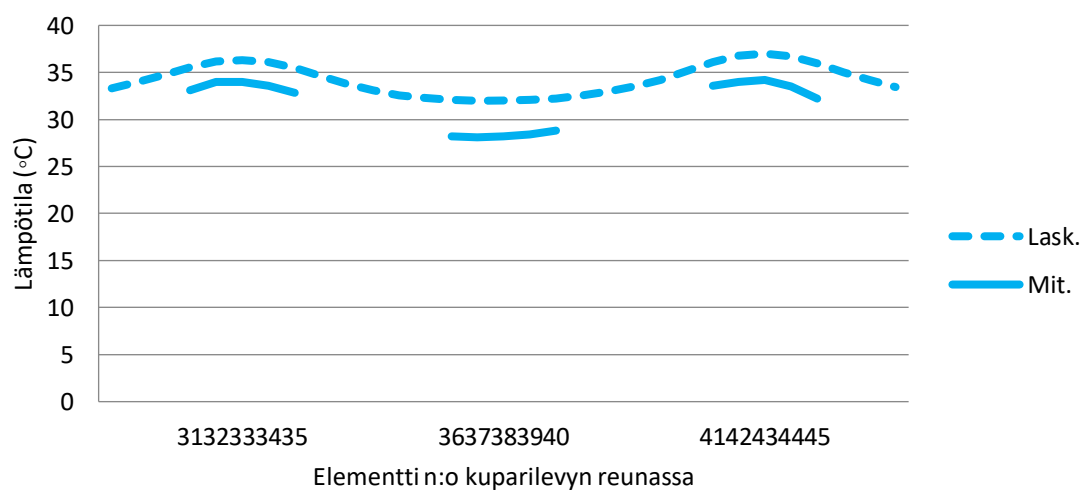
Kuva 41. Testi 15: Suojaamattomasta osasta elementeillä 1–15 mitatut ja lasketut lämpötilat vastakkaisilla 4,2 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.

7.5.3 Kuparilla suojattu magneettinen teräslevy kompensoiduilla virroilla

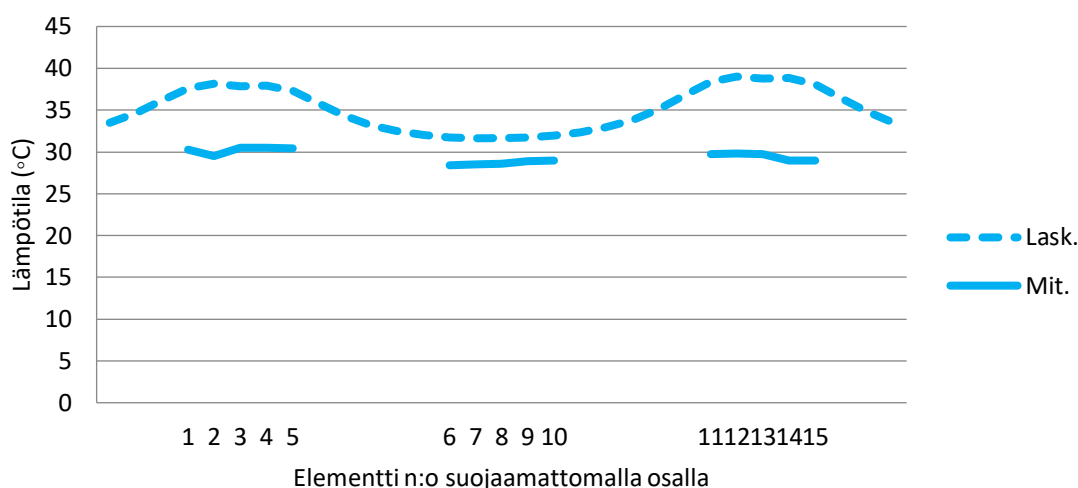
Testissä 16 tutkittiin kuparin kykyä suojata teräslevyä kompensoitujen virtojen aiheuttamalta lämpenemältä testikappaleella 3. Kuvissa 42–44 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat kaksivaiheisella kytkennällä 1600 mm vaihevälillä etäisyydellä. Kuvassa 42 on esitetty lämpötilat kuparilevyn keskellä. Kuvassa 43 on esitetty lämpötilat kuparilevyn reunassa ja kuvassa 44 on esitetty lämpötilat suojaamattomassa osassa.



Kuva 42. Testi 16: Kuparisuojan keskeltä elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat vastakkaisilla 4,2 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.



Kuva 43. Testi 16: Kuparisuojan reunasta elementeillä 31–45 mitatut ja lasketut lämpötilat vastakkaisilla 4,2 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.



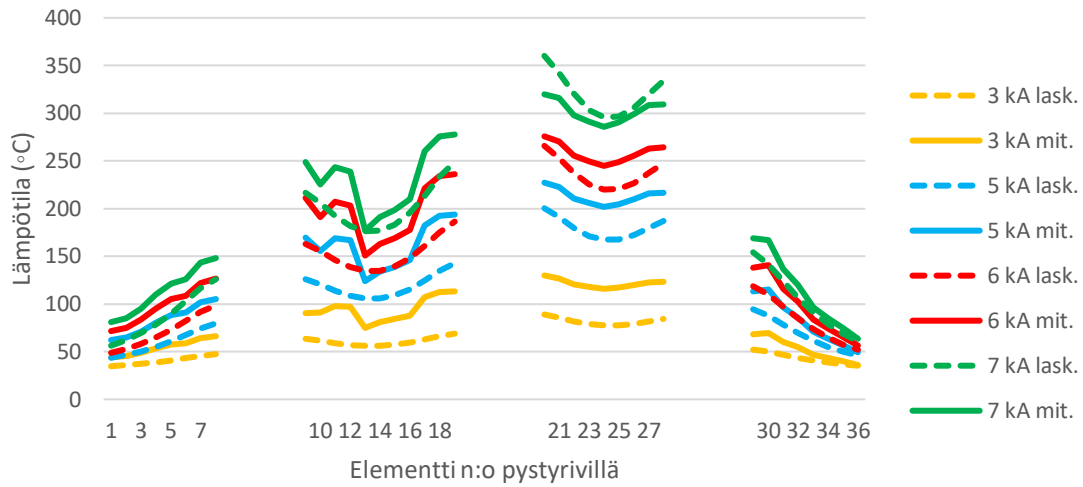
Kuva 44. Testi 16: Suojaamattomasta osasta elementeillä 1–15 mitatut ja lasketut lämpötilat vastakkaisilla 4,2 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.

7.6 Magneettisen teräslevyn pienet suorakaiteenmuotoiset läpivientiaukot

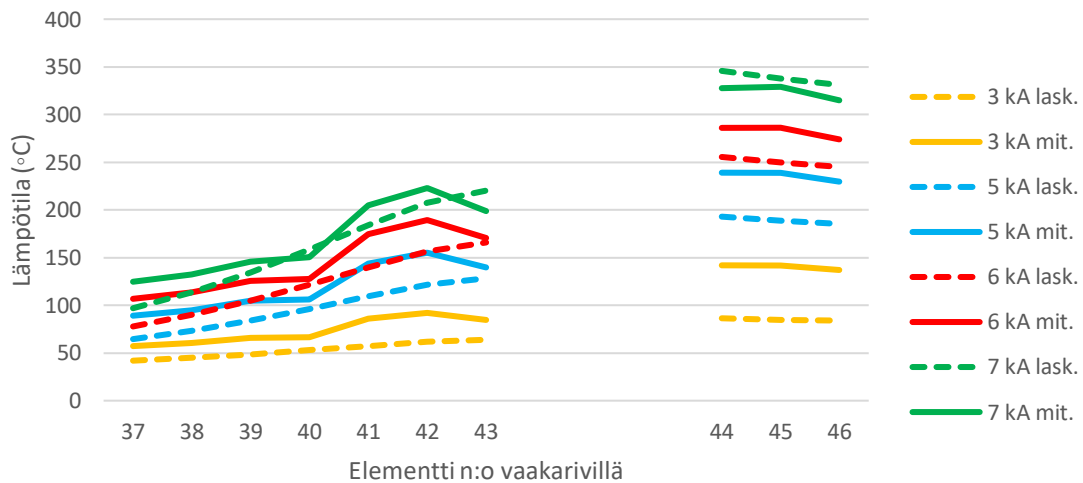
Testeissä 1–16 kiskot kulkivat tutkitun testikappaleen pinnan suuntaisesti. Testeissä 17–29 tutkittiin virtakiskojen aiheuttamaa lämpenemää, kun virtakiskot menevät läpi testikappaleissa olevista aukosta. Tällä pyrittiin selvittämään muuntajan läpivientikiskojen aiheuttamia lämpötiloja sähkövirran suuruuden ja taajuuden vaihdellessa.

7.6.1 Virran suuruuden vaikutus lämpötiloihin pienillä aukoilla

Testissä 17 tutkittiin läpivientikiskojen virran suuruuden vaikutusta lämpötiloihin testikappaleella 4, jossa vaihekiskojen aukkojen koot olivat 270 x 200 mm, mikä ovat niiden tarvitsemaan tilaan nähden hyvin pieni aukko. Muista kolmivaiheisista testeistä poiketen tässä testissä vaiheilla oli eri etäisyydet. Ylemmän vaiheen etäisyys keskimmaisesta oli 800 mm ja alemman vaiheen etäisyys oli 700 mm. Kuvassa 45 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat pystyriviltä. Kuvassa 46 on esitetty lämpötilat keskimmaisen vaiheen kohdalta vaakariviltä.



Kuva 45. Testi 17: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–36 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5, 6 ja 7 kA virroilla virtakiskojen mennessä läpi pienistä suorakaideaukoista, kun taajuus on 50 Hz.

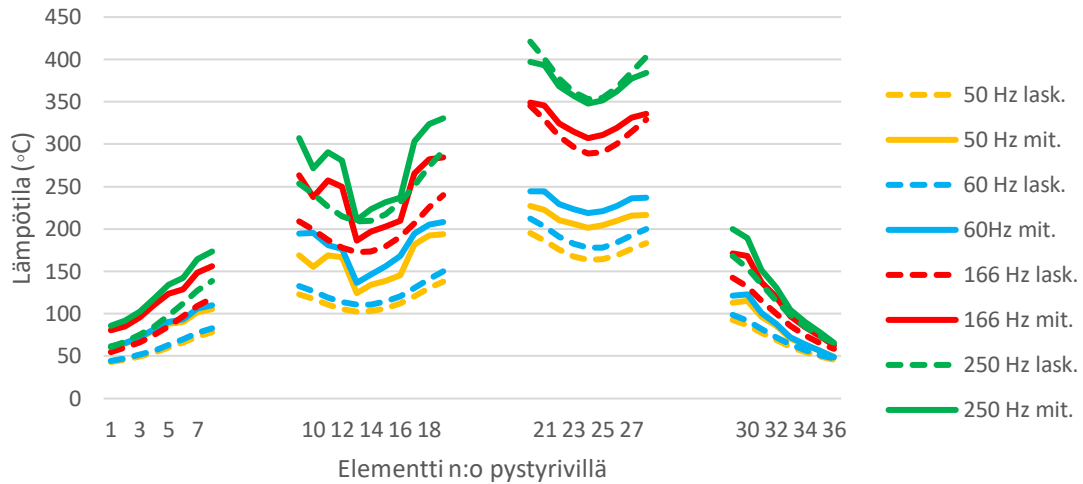


Kuva 46. Testi 17: Magneettisen teräslevyn elementeillä 37–46 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5, 6 ja 7 kA virroilla virtakiskojen mennessä läpi pienistä suorakaideaukoista, kun taajuus on 50 Hz.

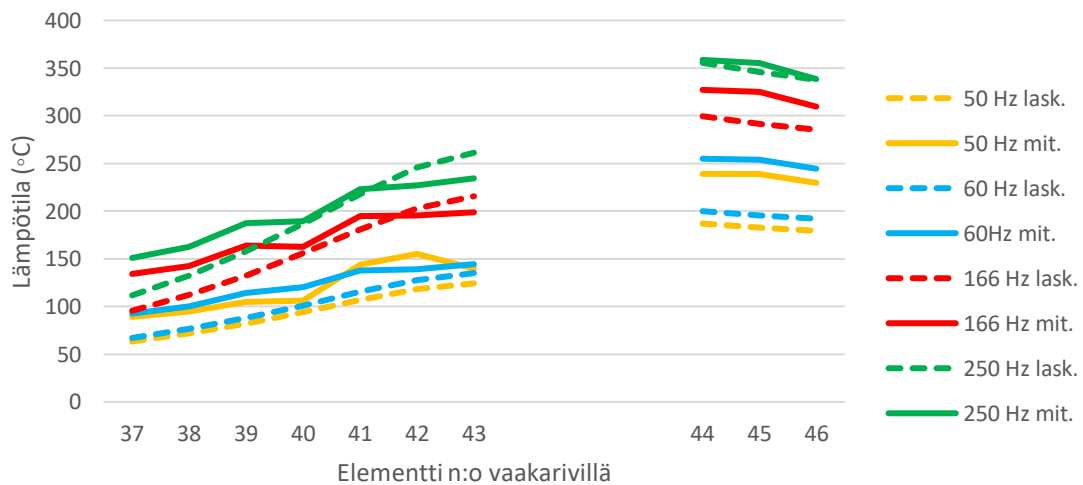
7.6.2 Virran taajuuden vaikutus lämpötiloihin pienillä aukoilla

Testissä 18 tutkittiin taajuuden vaikutusta virtakiskojen aiheuttamaan lämpenemään, kun kiskot menevät läpi testikappaleessa 4 olevista aukoista. Kuvassa 47 on esitetty

mitatut ja lasketut lämpötilat pystyriiviltä. Kuvassa 48 on esitetty lämpötilat keskimmäisen vaiheen kohdalta vaakariviltä.



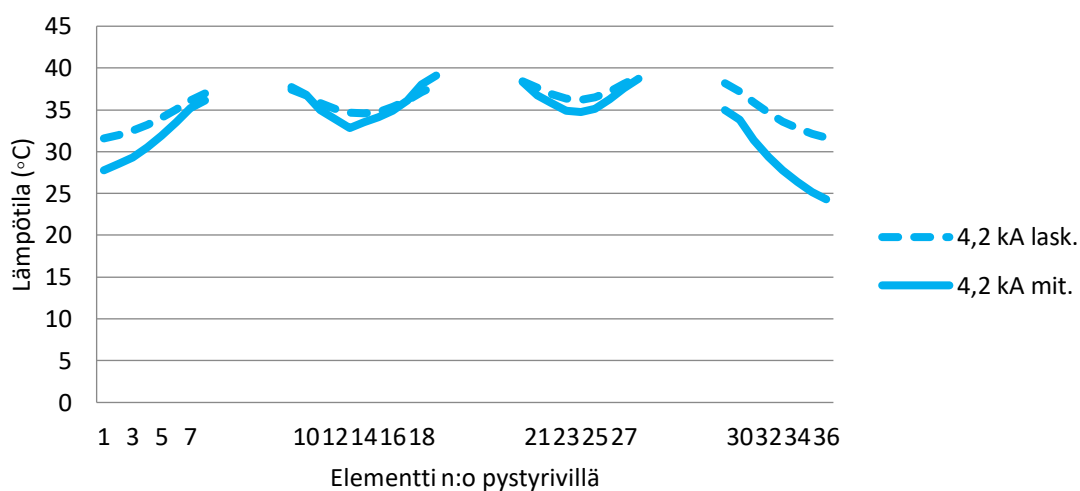
Kuva 47. Testi 18: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–36 pystyriiviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 50, 60, 166 ja 250 Hz taajuisten virtakiskojen mennessä läpi pienistä suorakaideaukoista, kun virta on 5 kA.



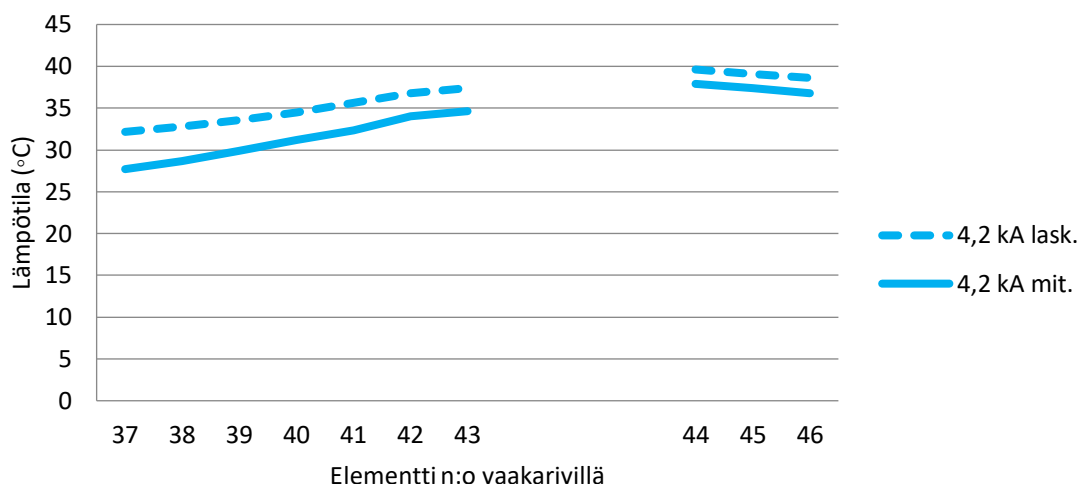
Kuva 48. Testi 18: Magneettisen teräslevyn elementeillä 37–46 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 50, 60, 166 ja 250 Hz taajuisten virtakiskojen mennessä läpi pienistä suorakaideaukoista, kun virta on 5 kA.

7.6.3 Kompensoinnin vaikutus lämpötiloihin pienillä aukoilla

Testissä 19 tutkittiin vastakkaisten sähkövirtojen vaikutusta lämpötiloihin, kun virtakiskot menevät läpi testikappaleessa 4 olevista 270 x 200 mm aukoista. Kuvassa 49 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat pystyriviltä. Kuvassa 50 on esitetty lämpötilat keskimmäisen vaiheen kohdalta vaakariviltä.



Kuva 49. Testi 19: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–36 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat kompensoituilla 4,2 kA virroilla, kun virtakiskot menevät läpi pienistä suorakaideaukoista.



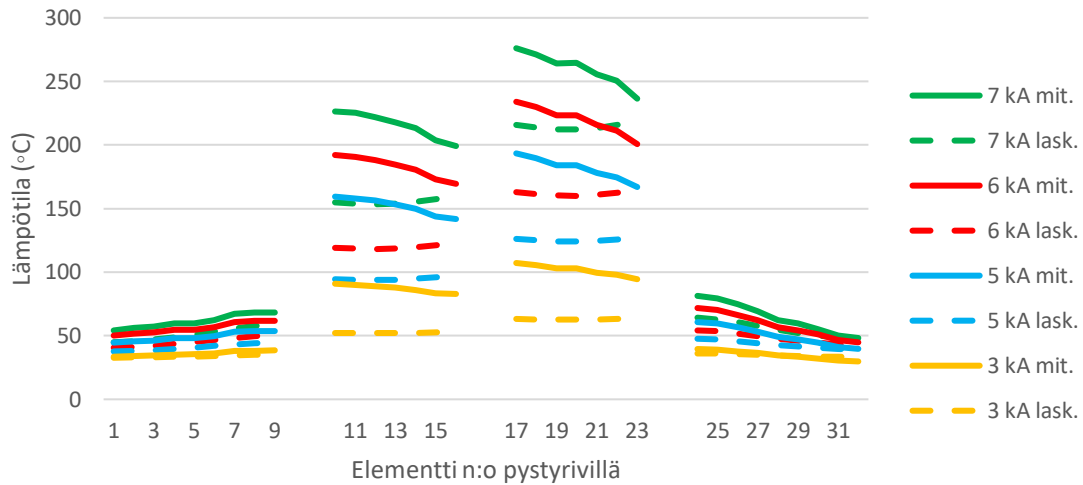
Kuva 50. Testi 19: Magneettisen teräslevyn elementeillä 37–46 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat kompensoituilla 4,2 kA virroilla, kun virtakiskot menevät läpi pienistä suorakaideaukoista.

7.7 Magneettisen teräslevyn suuret suorakaiteenmuotoiset läpivientiaukot

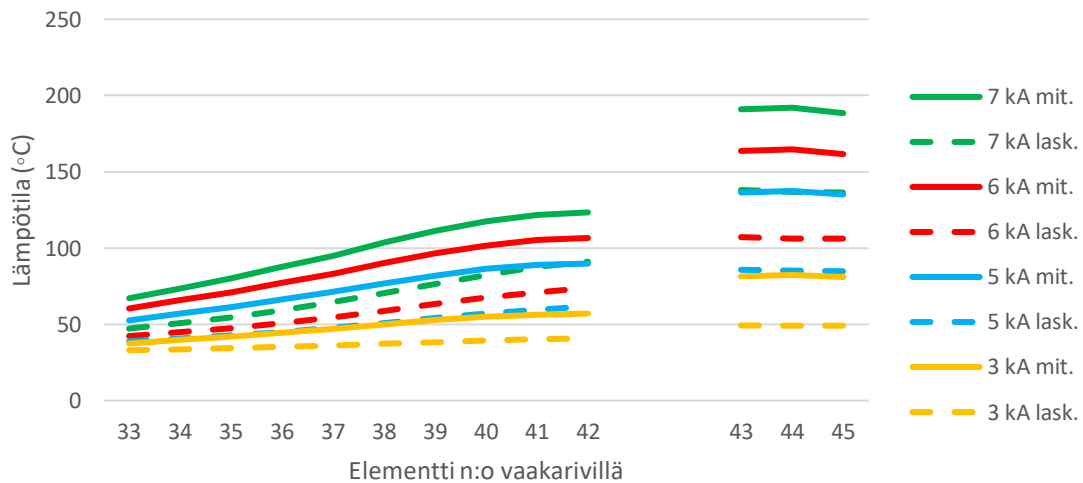
Testeissä 20–21 tutkittiin sähkövirran suuruuden vaikutusta lämpötiloihin, kun virtakiskot menevät läpi testikappaleessa 5 olevista aukoista 3, 5, 6 ja 7 kA virroilla. Testikappaleessa 5 vaihekiskojen aukkojen koot olivat 500 x 430 mm, mikä on niiden tarvitsemaan tilaan nähden suhteellisen suuri aukko. Vastaavasti taas vaiheväleihin jäävä teräskannas on suhteellisen kapea.

7.7.1 Virran suuruuden vaikutus lämpötiloihin suurilla aukoilla

Testissä 20 tutkittiin virran suuruuden vaikutusta läpivientialueen lämpenemään magneettisella teräksellä. Tässä testissä syntyi merkittävä ero vaihevälien kohdalla mitatun ja lasketun välille. Kuvassa 51 on esitetty lämpötilat pystyriviltä. Kuvassa 52 on esitetty lämpötilat keskimmäisen vaiheen kohdalta vaakariviltä.



Kuva 51. Testi 20: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–32 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5, 6 ja 7 kA virroilla virtakiskojen mennessä läpi suurista suorakaideaukoista, kun taajuus on 50 Hz.

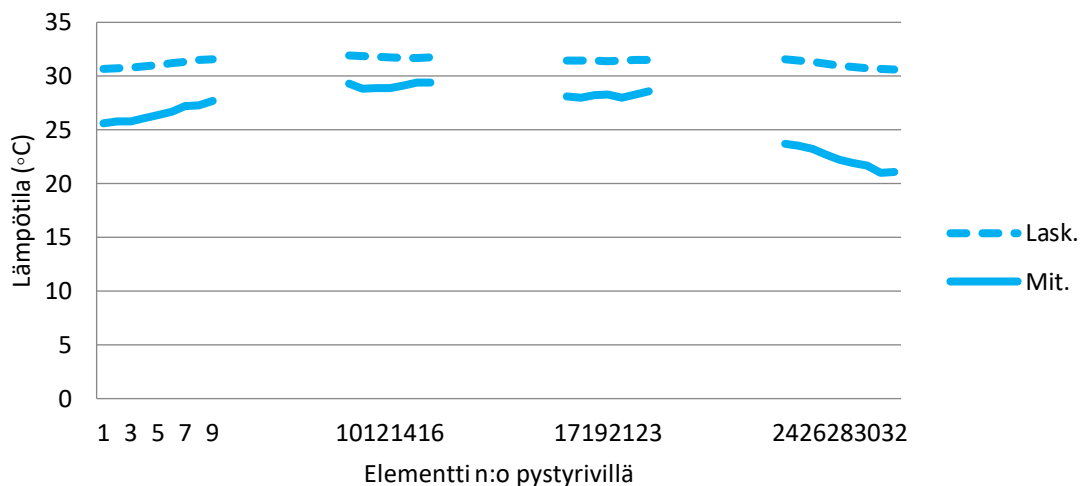


Kuva 52. Testi 20: Magneettisen teräslevyn elementeillä 33–45 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5, 6 ja 7 kA virroilla virtakiskojen mennessä läpi suurista suorakaideaukoista, kun taajuus on 50 Hz.

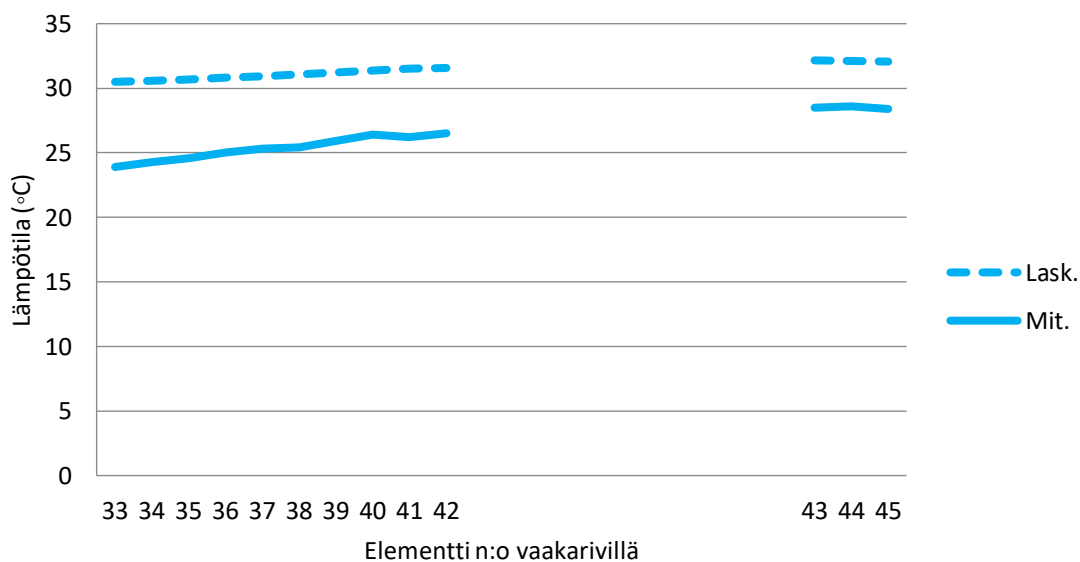
7.7.2 Kompensoinnin vaikutus lämpötiloihin suurilla aukoilla

Testissä 21 tutkittiin vastakkaisten sähkövirtojen vaikutusta lämpötiloihin magneettisella teräslevyllä, kun vastakkaiset virtakiskot menevät läpi testikappaleessa 5 olevista 500 x

430 mm aukoista. Kuvassa 53 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat pystyriviltä. Kuvassa 54 on esitetty lämpötilat keskimmäisen vaiheen kohdalta vaakariviltä.



Kuva 53. Testi 21: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–32 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat kompensoiduilla 4,2 kA virroilla, kun virtakiskot menevät läpi suurista suorakaideaukoista.



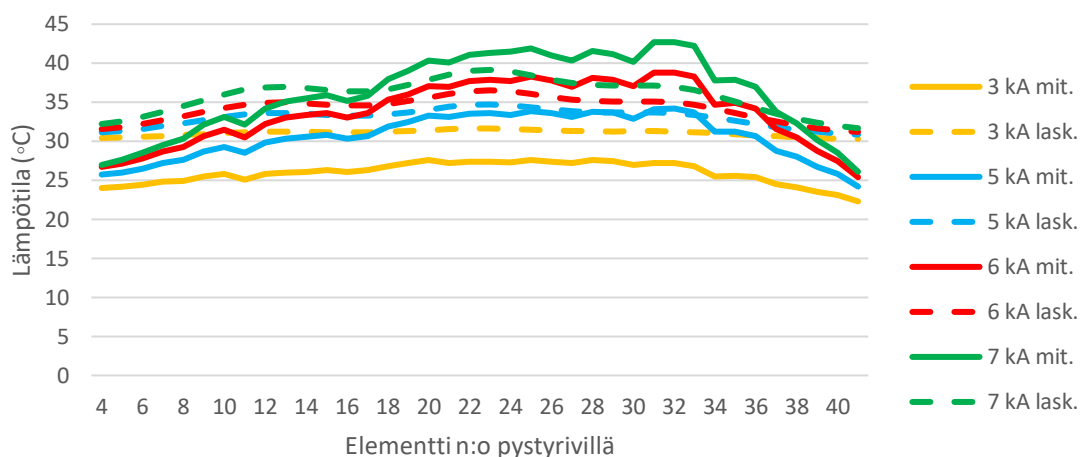
Kuva 54. Testi 21: Magneettisen teräslevyn elementeillä 33–45 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat kompensoiduilla 4,2 kA virroilla, kun virtakiskot menevät läpi suurista suorakaideaukoista.

7.8 Lämpivientikiskojen vaikutus lämpötiloihin epämagneettisessa teräksessä

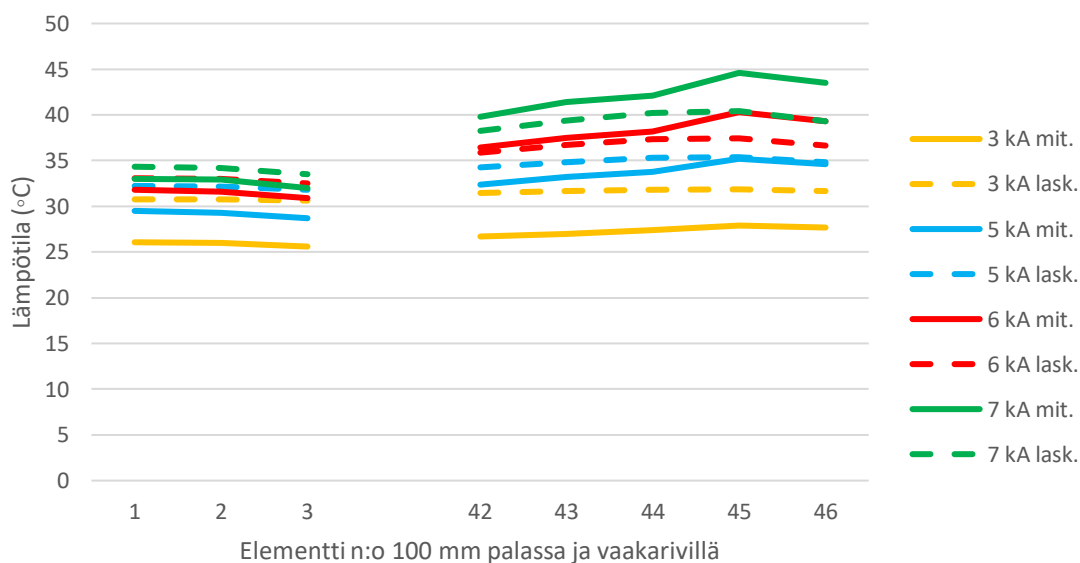
Testeissä 22–23 tutkittiin läpivientikiskojen sähkövirran suuruuden ja taajuuden vaikutusta epämagneettisen teräslevyn lämpötiloihin. Testeissä virtakiskot menivät testikappaleessa 6 olevista 270 x 200 mm läpivientiaukoista läpi. Muuntajien isovirtaisten läpivientien alueella käytetään tavallisesti epämagneettista terästä liian korkeiden lämpötilojen välttämiseksi. Testikappaleessa 6 oli levyn reunassa 570 mm leveä alue epämagneettista terästä. Muilta osin levy oli magneettista terästä. Lisäksi alemmassa vaihevälikissä oli 100 mm halkaisijainen pyöreä magneettinen alue, mikä vastaa esimerkiksi muuntajan nostokorvaa, jota ei mekaanisista syistä johtuen voida korvata epämagneettisella teräksellä.

7.8.1 Lämpivientikiskojen virran suuruuden vaikutus lämpötiloihin

Testissä 22 tutkittiin sähkövirran suuruuden vaikutusta lämpötiloihin epämagneettista läpivientialuetta käytettäessä. Kuvassa 55 on esitetty lämpötilat mitatut ja lasketut pysyvillä magneettisen alueen reunassa. Kuvassa 56 on esitetty lämpötilat 100 mm palasta sekä vaakariviltä.



Kuva 55. Testi 22: Magneettisen teräslevyn reunassa elementeillä 4–41 pystyriiviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5, 6 ja 7 kA virroilla, kun virtakiskot menevät läpi epämagneettisesta läpivientialueesta.

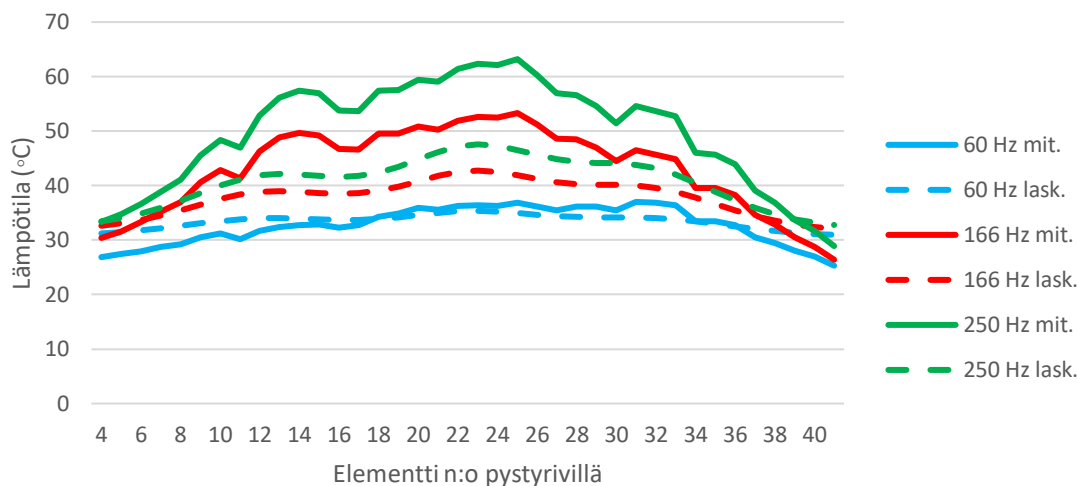


Kuva 56. Testi 22: Magneettisen teräslevyn elementeillä 42–46 vaakariiviltä ja 100 mm palan elementeillä 1–3 mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5, 6 ja 7 kA virroilla, kun virtakiskot menevät läpi epämagneettisesta läpivientialueesta.

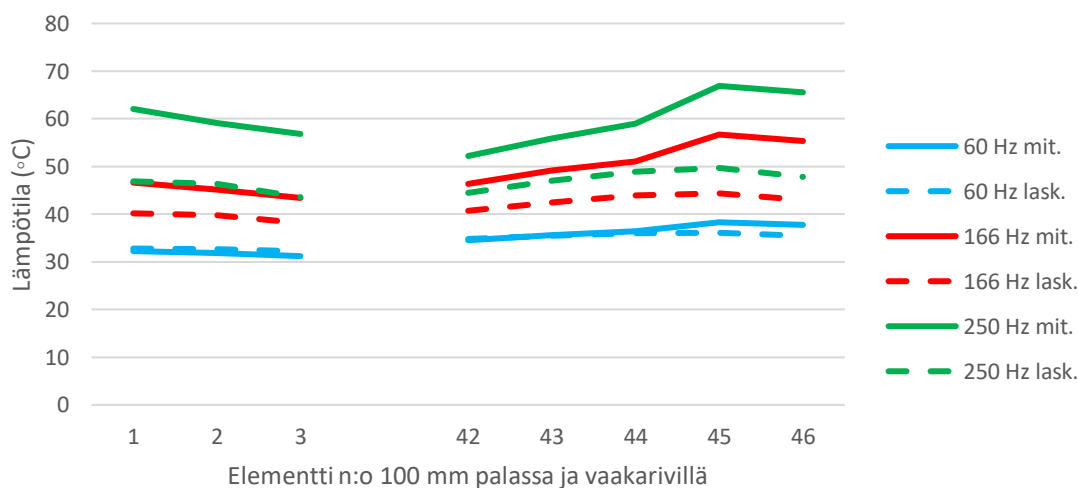
7.8.2 Lämpivientikiskojen taajuuden vaikutus lämpötiloihin

Testissä 23 tutkittiin virtakiskojen taajuuden vaikutusta lämpötiloihin epämagneettista läpivientialuetta käytettäessä. Kuvassa 57 on esitetty lämpötilat mitatut ja lasketut

pystyivillä magneettisen alueen reunassa. Kuvassa 58 on esitetty lämpötilat 100 mm palasta ja vaakariviltä.



Kuva 57. Testi 23: Magneettisen teräslevyn reunan elementeillä 4–41 pystyiviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun virtakiskot menevät läpi epämagneettisesta läpivientialueesta.



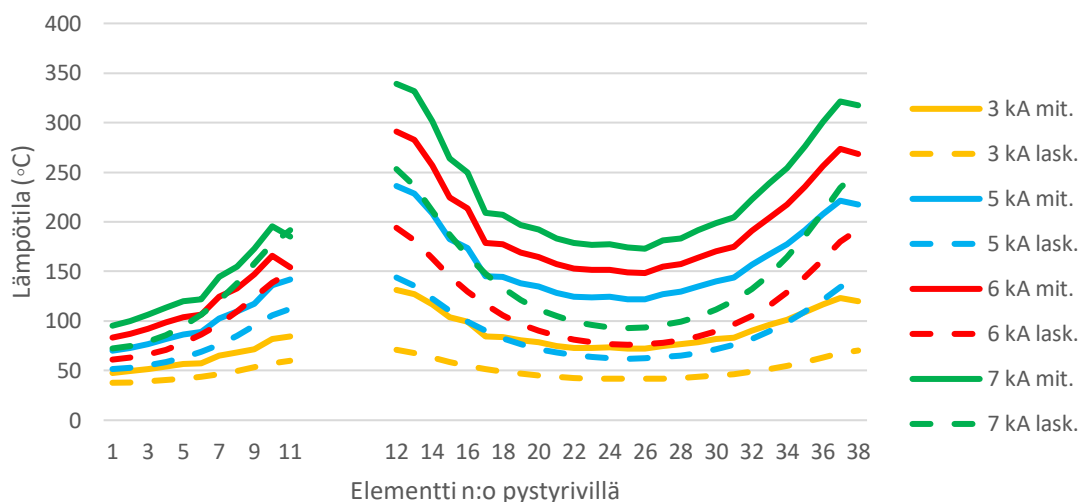
Kuva 58. Testi 23: Magneettisen teräslevyn elementeillä 42–46 vaakariviltä ja 100 mm palan elementeillä 1–3 mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun virtakiskot menevät läpi epämagneettisesta läpivientialueesta.

7.9 Magneettisen terälevyn läpivientiaukon halkaisijan vaikutus

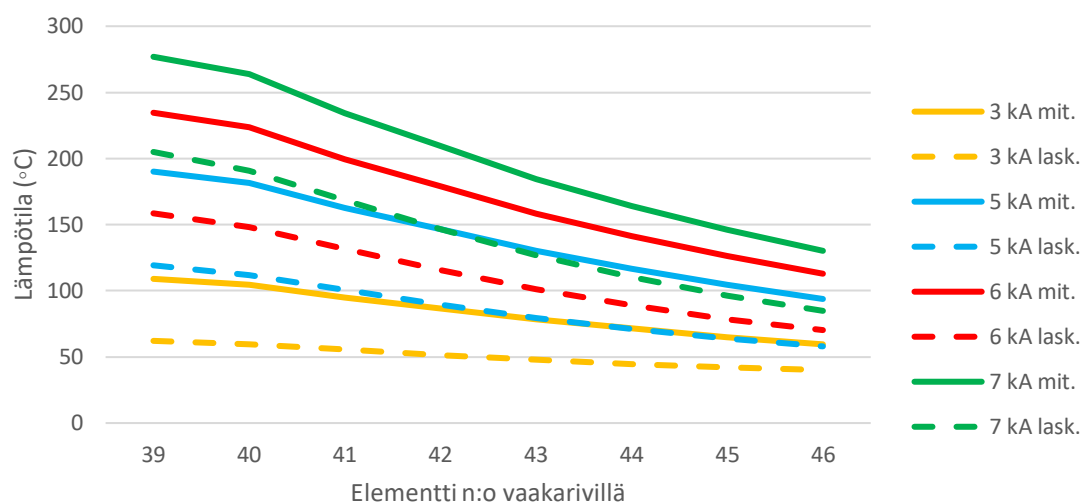
Testeissä 24–29 tutkittiin läpivientiaukon halkaisijan sekä virran ja taajuuden vaikutusta magneettisen terälevyn lämpötiloihin.

7.9.1 300 mm läpivientiaukkojen lämpötilat eri virroilla

Testissä 24 tutkittiin virran suuruuden vaikutusta magneettisen terälevyn lämpötiloihin, kun virtakiskot menevät läpi testikappaleessa 7 olevista aukoista. Testeissä 17–23 tutkittiin suorakaiteenmuotoisia aukkoja. Testeissä 24–29 tutkittiin pyöreillä aukoilla virran ja taajuuden vaikutusta lämpötiloihin. Testikappaleessa 7 pyöreiden aukkojen halkaisija oli 300 mm. Kuvassa 59 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat pystyriviltä. Kuvassa 60 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat vaakariviltä.



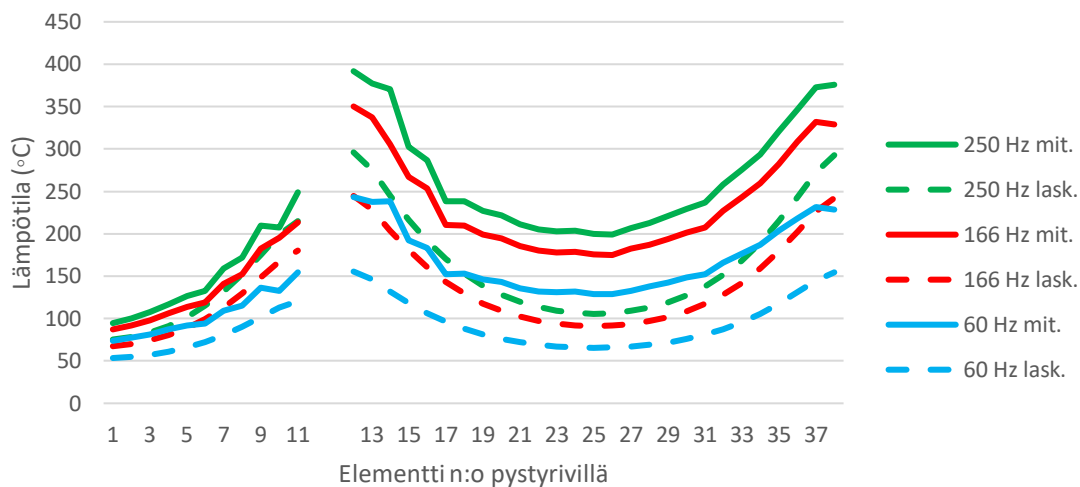
Kuva 59. Testi 24: Magneettisen terälevyn elementeillä 1–38 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5, 6 ja 7 kA virroilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 300 mm ja taajuus on 50 Hz.



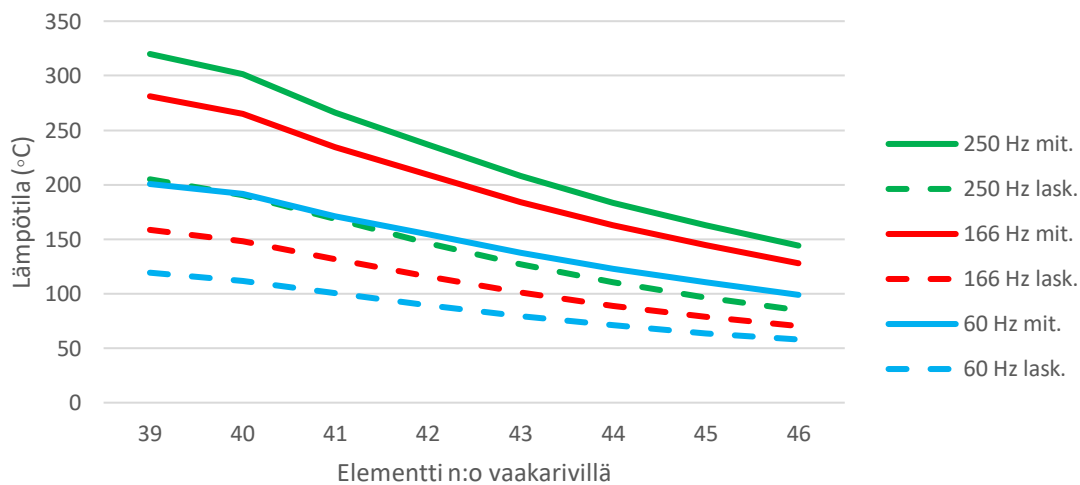
Kuva 60. Testi 24: Magneettisen teräslevyn elementeillä 39–46 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5, 6 ja 7 kA virroilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 300 mm ja taajuus on 50 Hz.

7.9.2 300 mm läpivientiaukkojen lämpötilat eri taajuuksilla

Testissä 25 tutkittiin virran taajuuden vaikutusta magneettisen teräslevyn lämpötiloihin, kun virtakiskot menevät läpi testikappaleessa 7 olevista 300 mm halkaisijan aukoista. Kuvassa 61 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat pystyriviltä. Kuvassa 62 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat vaakariviltä.



Kuva 61. Testi 25: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–38 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 300 mm.

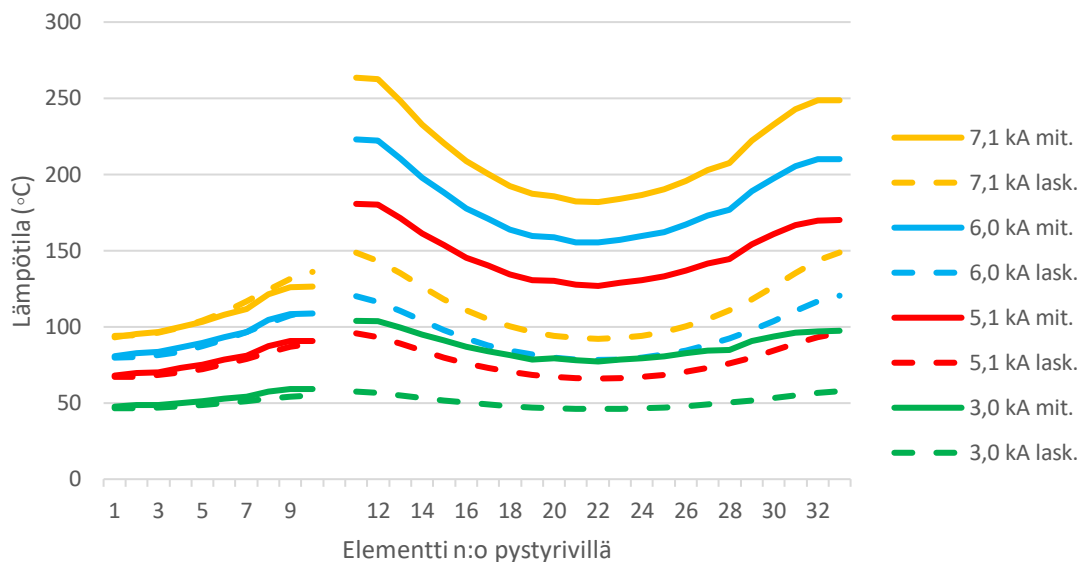


Kuva 62. Testi 25: Magneettisen teräslevyn elementeillä 39–46 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 300 mm.

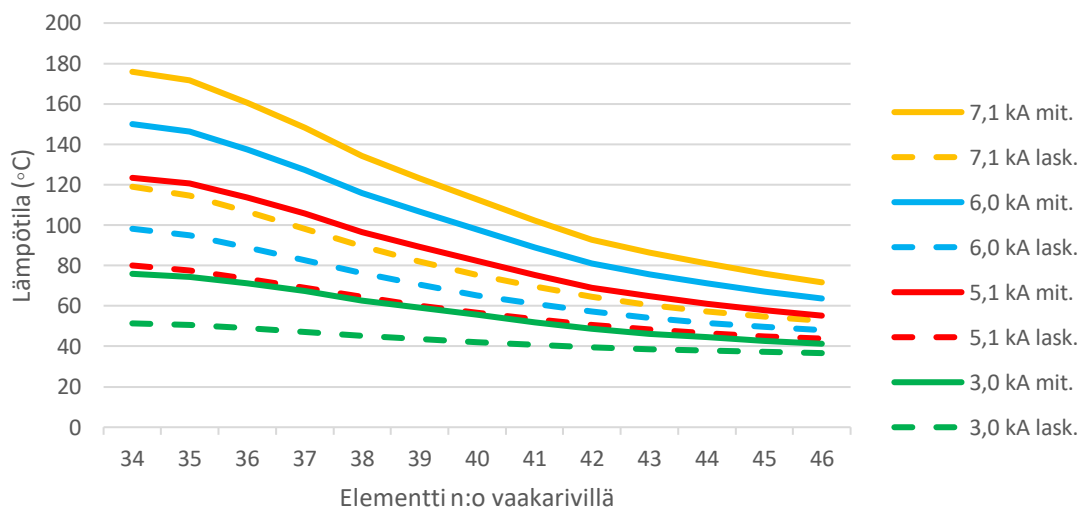
7.9.3 500 mm läpivientiaukkojen lämpötilat eri virroilla

Testissä 26 tutkittiin virran suuruuden vaikutusta magneettisen teräslevyn lämpötiloihin, kun virtakiskot menevät läpi testikappaleessa 8 olevista aukoista. Testikappaleessa 8

pyöreiden aukkojen halkaisija oli 500 mm. Kuvassa 63 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat pystyriiviltä. Kuvassa 64 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat vaakariviltä.



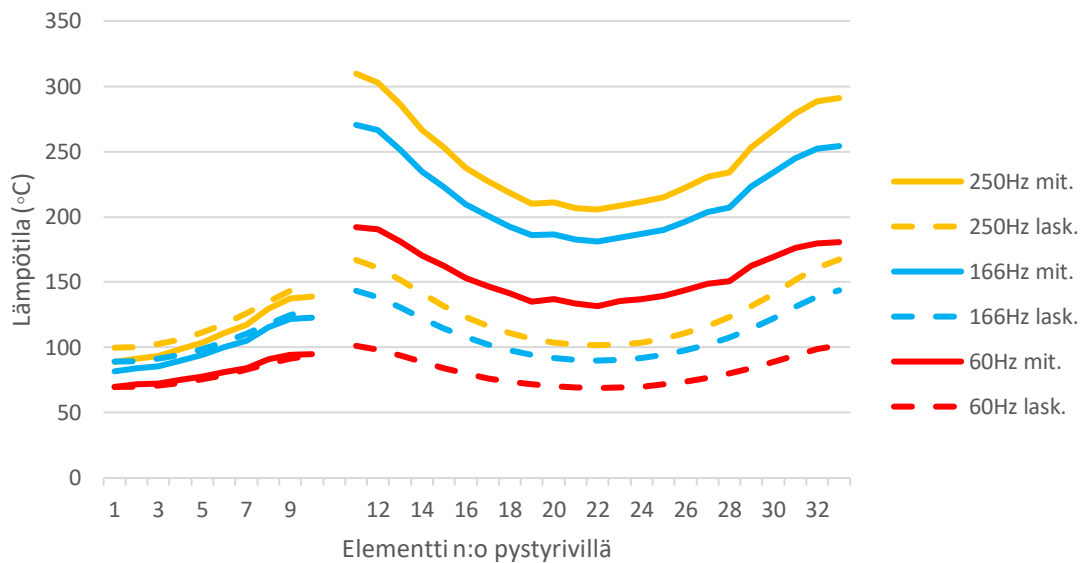
Kuva 63. Testi 26: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–32 pystyriiviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5.1, 6 ja 7.1 kA virroilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 500 mm ja taajuus on 50 Hz.



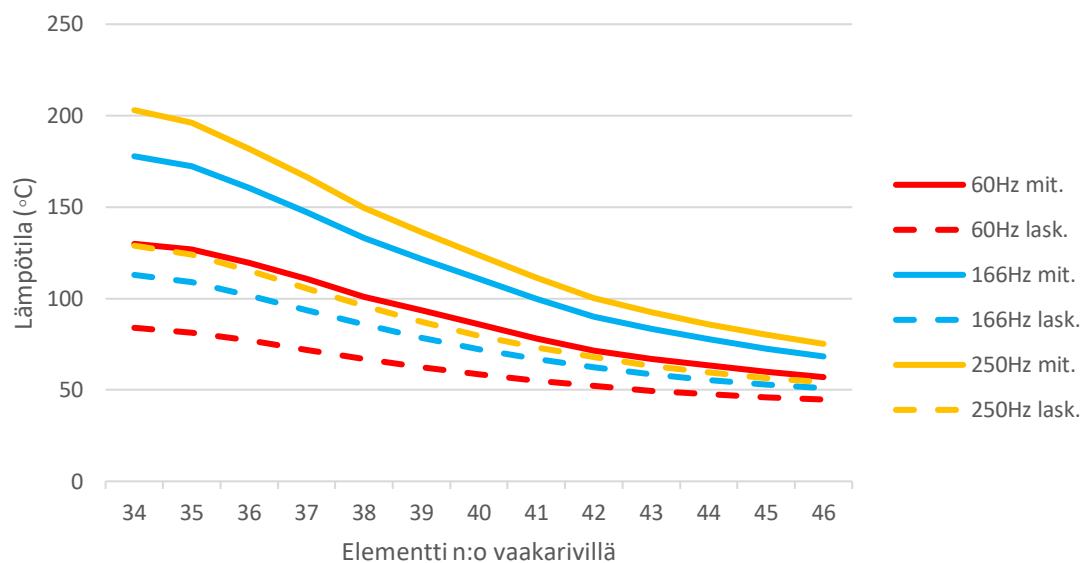
Kuva 64. Testi 26: Magneettisen teräslevyn elementeillä 34–46 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5.1, 6 ja 7.1 kA virroilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 500 mm ja taajuus on 50 Hz.

7.9.4 500 mm läpivientiaukkojen lämpötilat eri taajuuksilla

Testissä 27 tutkittiin virran taajuuden vaikutusta magneettisen teräslevyn lämpötiloihin, kun virtakiskot menevät läpi testikappaleessa 8 olevista aukoista. Testikappaleessa 8 pyöreiden aukkojen halkaisija oli 500 mm. Kuvassa 65 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat pystyriviltä. Kuvassa 66 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat vaakariviltä.



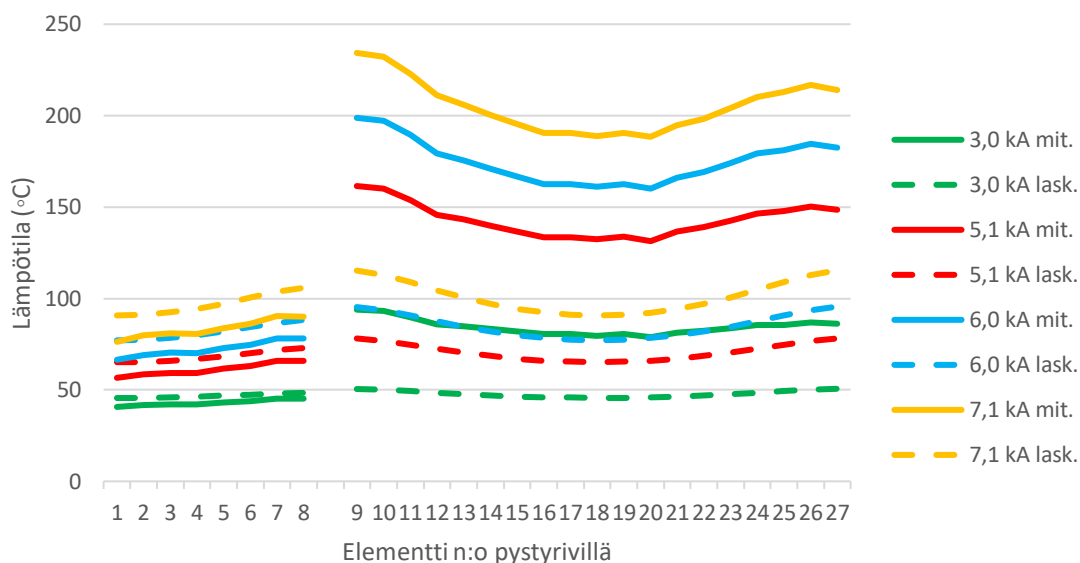
Kuva 65. Testi 27: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–33 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 500 mm.



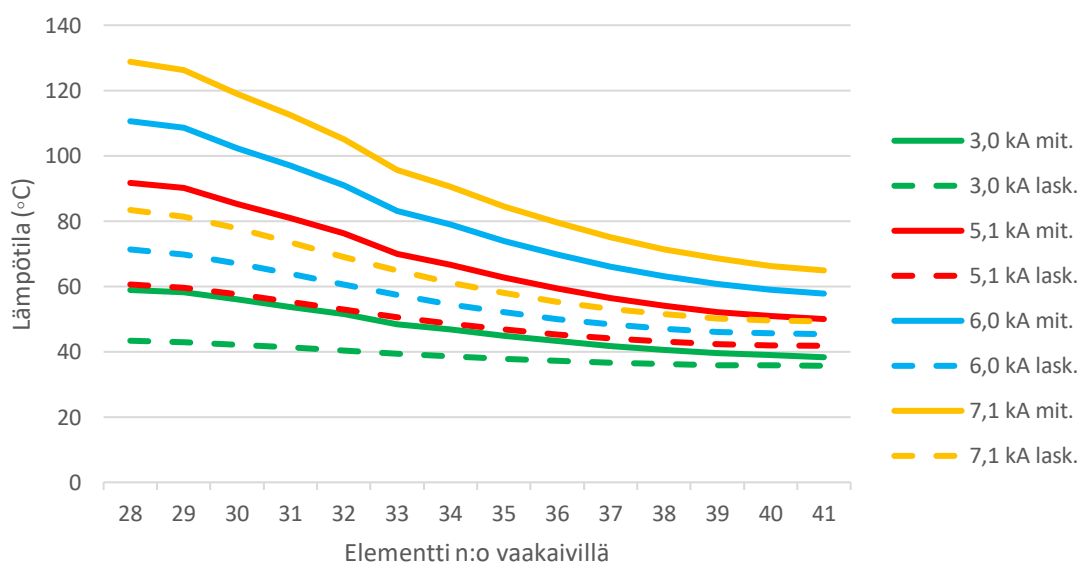
Kuva 66. Testi 27: Magneettisen teräslevyn elementeillä 34–46 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 500 mm.

7.9.5 700 mm läpivientiaukkojen lämpötilat eri virroilla

Testissä 28 tutkittiin sähkövirran suuruuden vaikutusta magneettisen teräslevyn lämpötiloihin, kun virtakiskot menevät läpi testikappaleessa 9 olevista aukoista. Testikappaleessa 9 pyöreiden aukkojen halkaisija oli 700 mm. Kuvassa 67 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat pystyriviltä. Kuvassa 68 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat vaakariviltä.



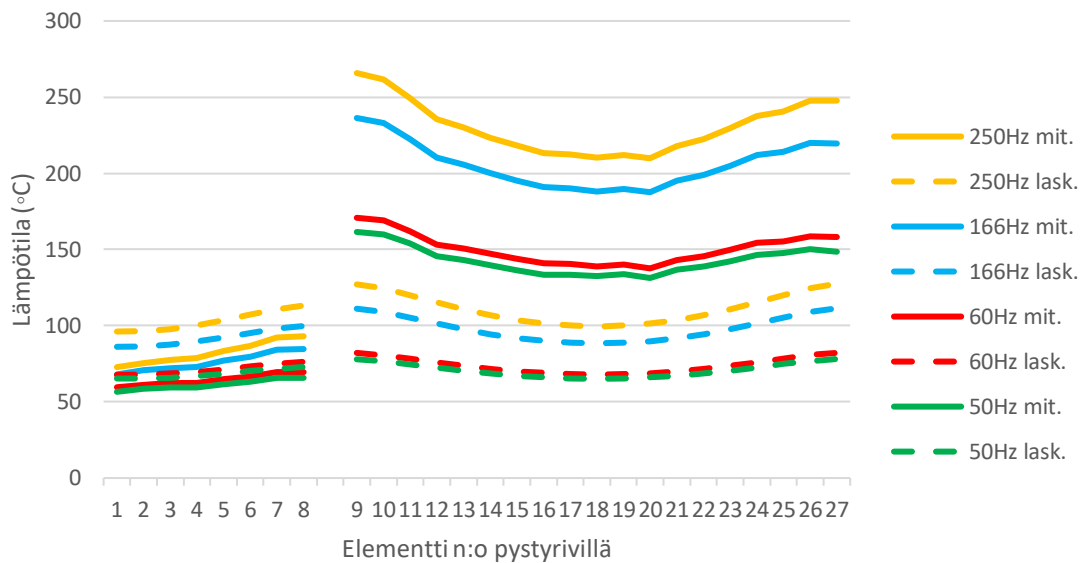
Kuva 67. Testi 28: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–27 pystyriiviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5.1, 6 ja 7.1 kA virroilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 700 mm ja taajuus on 50 Hz.



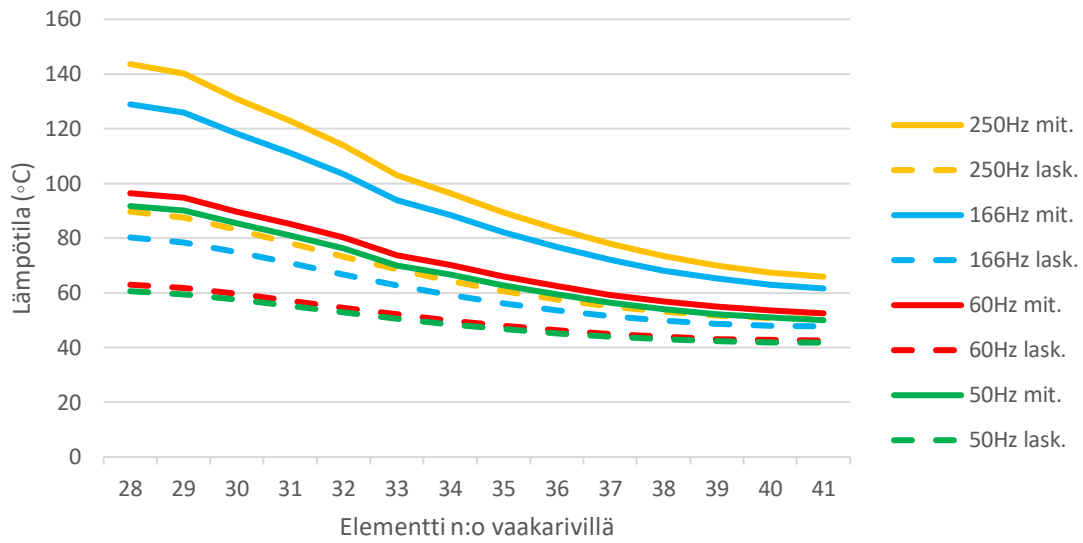
Kuva 68. Testi 28: Magneettisen teräslevyn elementeillä 28–41 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 3, 5.1, 6 ja 7.1 kA virroilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 700 mm ja taajuus on 50 Hz.

7.9.6 700 mm läpivientiaukkojen lämpötilat eri taajuuksilla

Testissä 29 tutkittiin virran taajuuden vaikutusta magneettisen teräslevyn lämpötiloihin, kun virtakiskot menevät läpi testikappaleessa 9 olevista aukoista. Testikappaleessa 9 pyöreiden aukkojen halkaisija oli 700 mm. Kuvassa 69 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat pystyriviltä. Kuvassa 70 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat vaakariviltä.



Kuva 69. Testi 29: Magneettisen teräslevyn elementeillä 1–27 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 700 mm.



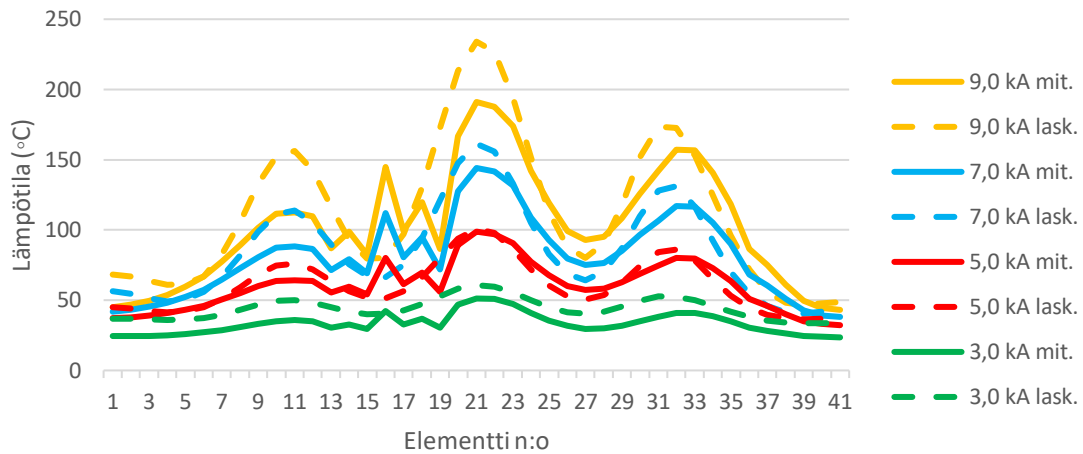
Kuva 70. Testi 29: Magneettisen teräslevyn elementeillä 28–41 vaakariviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun virtakiskojen aukkojen halkaisija on 700 mm.

7.10 Suojaamaton epämagneettinen teräslevy

Myöhemmin 2010 vuonna tehdyissä testeissä haluttiin selvittää epämagneettisen teräksen lämpötiloja, kun virtakiskot ovat rinnakkain testikappaleen kanssa. Testeissä D1–D3 tutkittiin suojaamattoman levyn lämpötiloja virran, etäisyyden ja taajuuden muuttuessa.

7.10.1 Virran vaikutus epämagneettisen teräslevyn lämpötiloihin

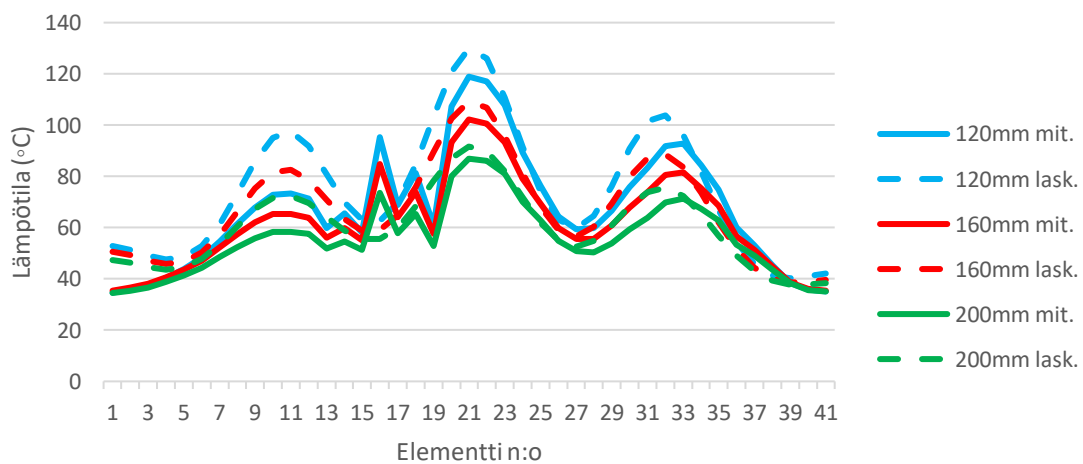
Testissä D1 tutkittiin sähkövirran suuruuden vaikutusta epämagneettisen teräslevyn lämpötiloihin, kun taajuus on 50 Hz ja virtakiskojen etäisyys on 80 mm testikappaleesta D1. Kuvassa 71 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat pystyriviltä.



Kuva 71. Testi D1: Epämagneettisen teräslevyn elementeillä 1–41 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 3, 5, 7 ja 9 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.

7.10.2 Etäisyyden vaikutus epämagneettisen teräslevyn lämpötiloihin

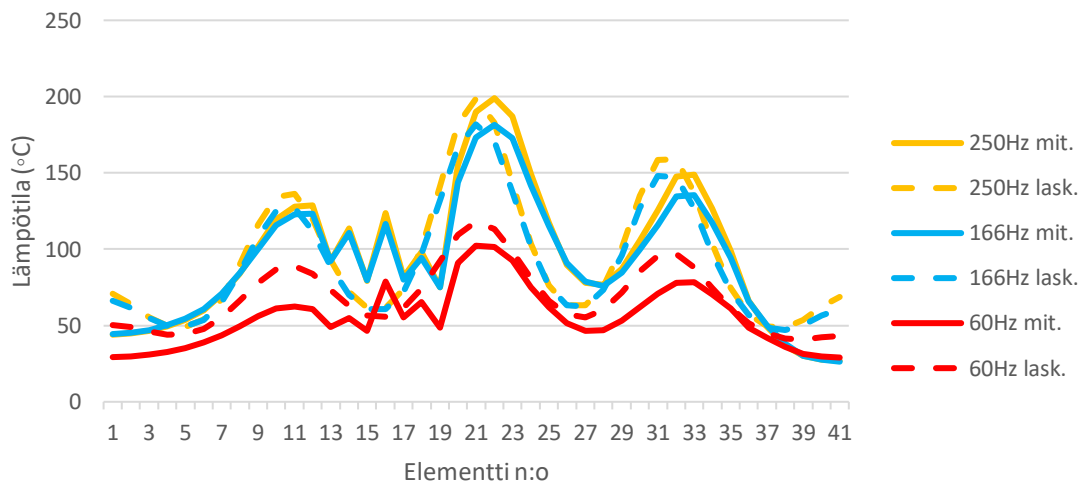
Testissä D2 tutkittiin virtakiskojen etäisyyden vaikutusta testikappaleen D1 lämpötiloihin, kun taajuus on 50 Hz ja virtakiskojen virta on 7 kA. Kuvassa 72 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat testikappaleen keskeltä pystyriviltä.



Kuva 72. Testi D2: Epämagneettisen teräslevyn elementeillä 1–41 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 7 kA virralla 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun taajuus on 50 Hz.

7.10.3 Taajuuden vaikutus epämagneettisen teräslevyn lämpötiloihin

Testissä D3 tutkittiin virran taajuuden vaikutusta testikappaleen D1 lämpötiloihin, kun virtakiskojen virta on 5kA ja kiskojen ja testikappaleen välinen etäisyys on 80 mm. Kuvassa 73 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat pystyriviltä.



Kuva 73. Testi D3: Epämagneettisen teräslevyn elementeillä 1–41 pystyriviltä mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun etäisyys on 80 mm.

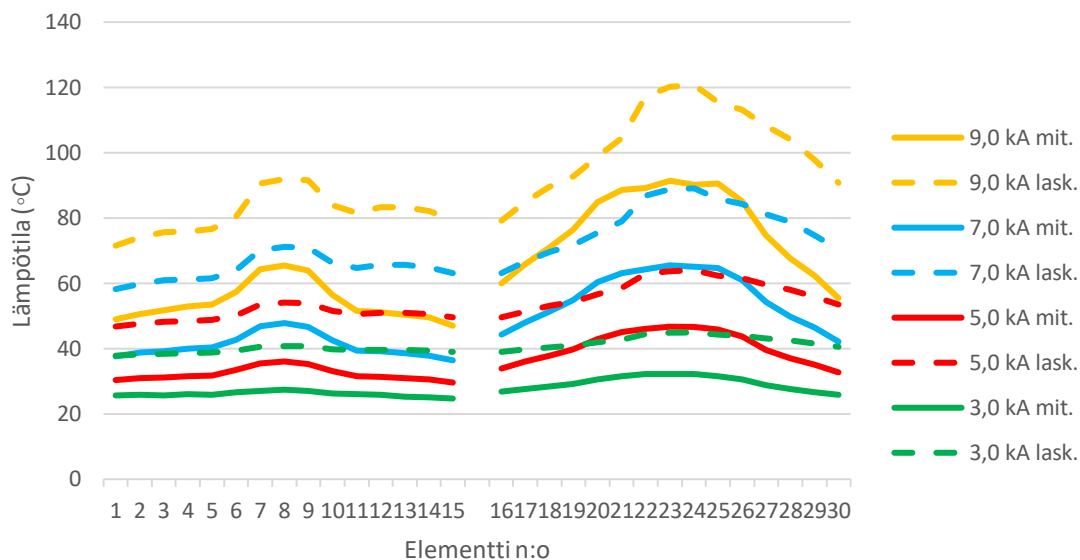
7.11 Kuparilla suojattu epämagneettinen teräslevy

Testeistä D1–D3 nähdään, että virtakiskon kanssa rinnakkaiseen epämagneettiseen teräslevyyn syntyy korkeita lämpötiloja. Testeissä D4–D6 tutkittiin, kuinka paljon kuparisuojauksella voidaan alentaa levyssä syntyviä lämpötiloja testikappaleella D2. Samalla tutkittiin lämpötiloja myös kuparilevyn keskellä ja sen reunassa.

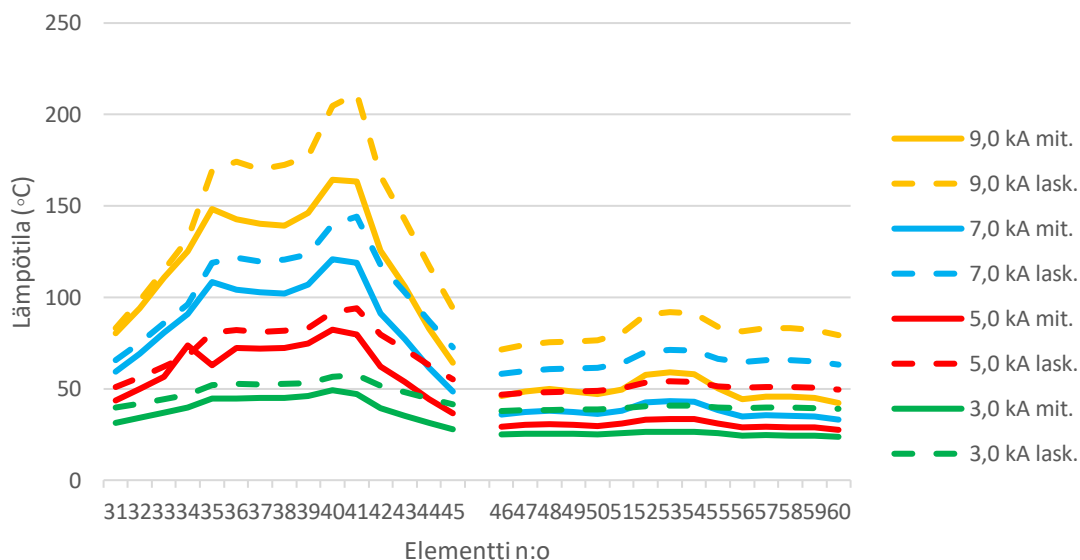
7.11.1 Virran vaikutus lämpötiloihin kuparisuojalla

Testissä D4 tutkittiin virran suuruuden vaikutusta kuparilla suojatun epämagneettisen teräslevyn lämpötiloihin, kun taajuus on 50 Hz ja virtakiskojen etäisyys testikappaleesta on 80 mm. Kuvassa 74 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat kuparisuojan keskellä ja

sen reunassa. Kuvassa 75 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat suojaamattomassa osassa ja kuparisuojan takana epämagneettisessa teräksessä.



Kuva 74. Testi D4: Kuparisuojan keskeltä elementeillä 1–15 ja kuparisuojan reunasta elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat keskimmäisen vaiheen 3, 5, 7 ja 9 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.

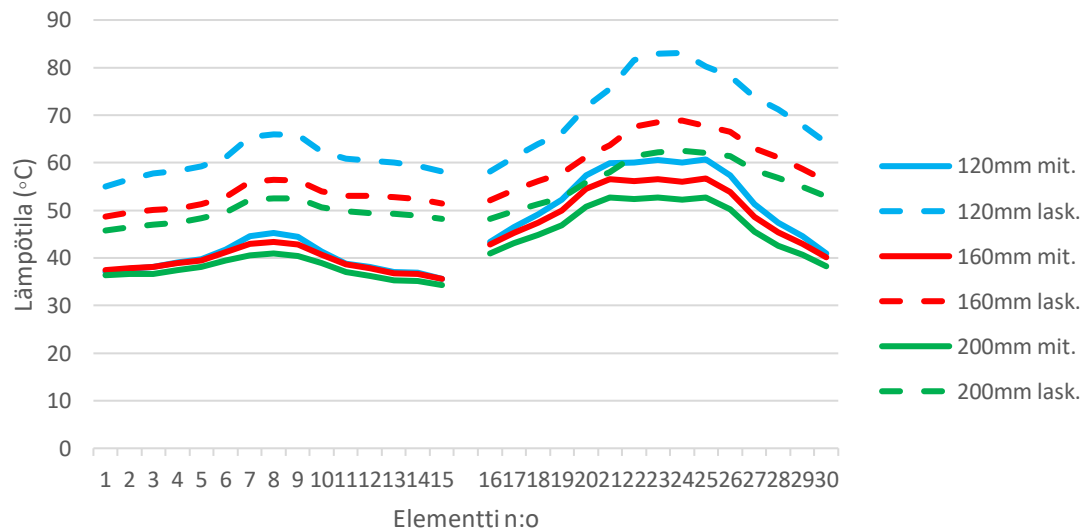


Kuva 75. Testi D4: Epämagneettisen teräslevyn suojaamattoman osan keskeltä elementeillä 31–45 ja kuparisuojan takaa elementeillä 46–60 mitatut ja lasketut

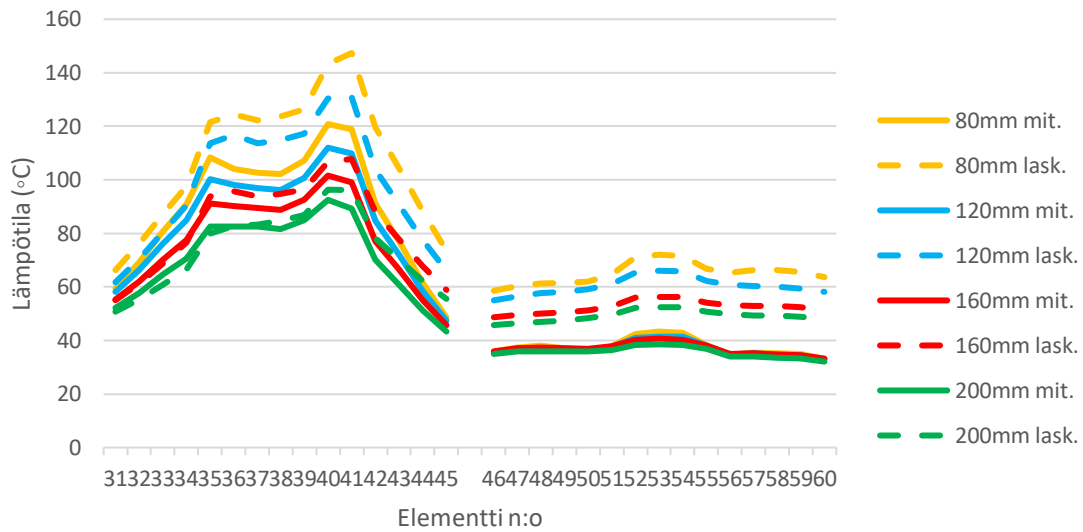
lämpötilat keskimmäisen vaiheen 3, 5, 7 ja 9 kA virroilla, kun etäisyys on 80 mm ja taajuus on 50 Hz.

7.11.2 Etäisyyden vaikutus lämpötiloihin kuparisuojalla

Testissä D5 tutkittiin virtakiskon etäisyyden vaikutusta kuparilla suojatun epämagneettisen teräslevyn lämpötiloihin, kun taajuus on 50 Hz ja keskimmäisen vaiheen kiskojen virta on 7 kA. Kuvassa 76 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat kuparisuojan keskellä ja sen reunassa. Kuvassa 77 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat suojaamattomassa osassa ja kuparisuojan takana epämagneettisessa teräksessä.



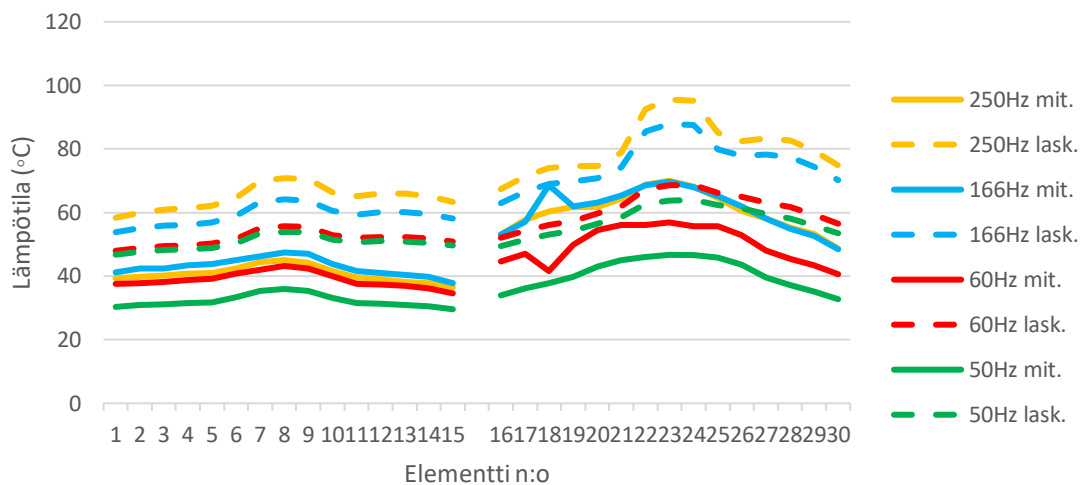
Kuva 76. Testi D5: Kuparisuojan keskeltä elementeillä 1–15 ja kuparinsuojan reunasta elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat 7 kA virralla 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun taajuus on 50 Hz.



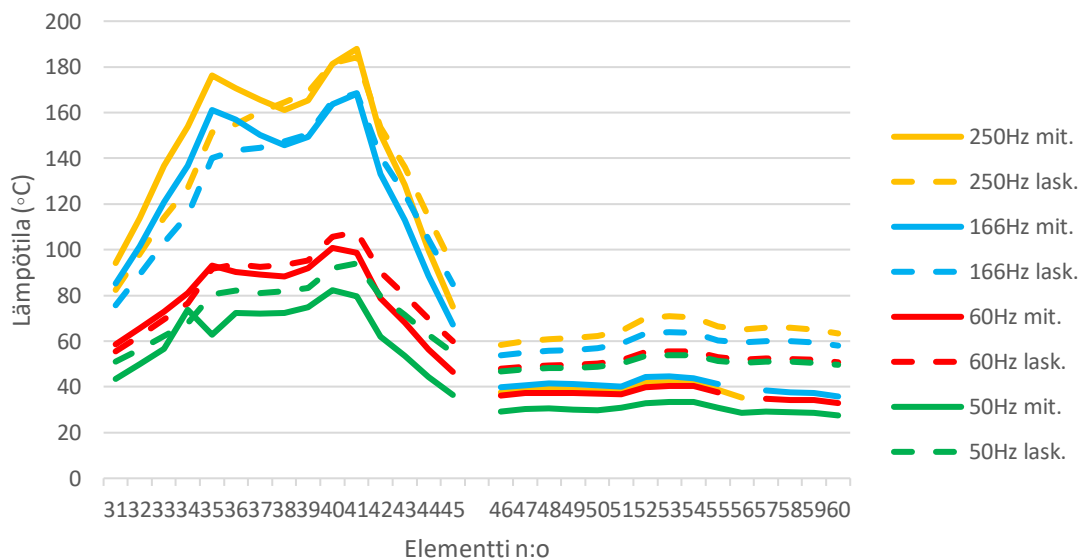
Kuva 77. Testi D5: Epämagneettisen teräslevyn suojaamattoman osan keskeltä elementeillä 31–45 ja kuparisuojan takaa elementeillä 46–60 mitatut ja lasketut lämpötilat 7 kA virralla 120, 160 ja 200 mm etäisyyksillä, kun taajuus on 50 Hz.

7.11.3 Taajuuden vaikutus lämpötiloihin kuparisuojalla

Testissä D6 tutkittiin virtakiskojen taajuuden vaikutusta testikappaleen D2 lämpötiloihin, kun virtakiskojen virta on 7 kA ja kiskojen etäisyys testikappaleesta on 80 mm. Kuvassa 78 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat kuparisuojan keskellä ja sen reunassa. Kuvassa 79 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat suojaamattomassa osassa ja kuparisuojan takana epämagneettisessa teräksessä.



Kuva 78. Testi D6: Kuparisuojan keskeltä elementeillä 1–15 ja kuparisuojan reunasta elementeillä 16–30 mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun etäisyys on 80 mm.



Kuva 79. Testi D6: Epämagneettisen teräslevyn suojaamattoman osan keskeltä elementeillä 31–45 ja kuparisuojan takaa elementeillä 46–60 mitatut ja lasketut lämpötilat 5 kA virralla 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla, kun etäisyys on 80 mm.

8 Pohdinta ja johtopäätökset

Kaikissa simuloinneissa käytettiin samoja simulointiasetuksia ja materiaalien ominaisuuksia. Suuressa osassa testejä mitatut ja lasketut lämpötilat sekä niiden muodostamat käyrämuodot olivat lähellä toisiaan. Tämä kertoo siitä, että käytössä ollut simulointirutiini on antanut useimmissa tapauksissa varsin luotettavia tuloksia. Toisaalta eroakin on ollut osassa tapauksista. Näistä selkeimpinä esimerkkeinä ovat tapaukset, joissa magneettista teräslevyä käytettiin läpivientilevynä sekä magneettisen teräslevyn ollessa suojattuna alumiinilevyllä. Molemmissa tapauksissa lasketut lämpötilat jäivät hyvin alhaisiksi mitattuihin nähden. Käytettäessä kuparilevysuojausta alumiinin sijaan magneettisen teräslevyn lasketut lämpötilat ovat lähempänä mitattuja. Sen sijaan kuparilevyllä suojatulle epämagneettiselle teräslevylle laskettiin liian korkeita lämpötiloja. Muissa testeistä mitatut ja lasketut lämpötilat olivat lähellä toisiaan. Voidaankin todeta, että magneettisen teräslevyn pinnan suuntaan kulkevien virtakiskojen aiheuttamat lämpötilat saadaan laskettua hyvällä tarkkuudella kaikilla tutkituilla kompensoiduilla ja kompensomattomilla virroilla, taajuuksilla ja kiskojen etäisyyksillä.

Testeissä 17–29 kiskot menivät testikappaleiden läpi. Näissä testeissä magneettisella teräslevyllä syntyi eroa varsinkin vaiheväleissä mitatun ja lasketun välille sitä enemmän mitä suurempi läpivientiaukko levyssä oli. Vaiheväljää lukuun ottamatta läpivientilevyjen lämpötilat saatiin laskettua kohtuullisella tarkkuudella. Epämagneettisella teräksellä mitatut ja lasketut lämpötilat ovat pieniä kiskojen mennessä levystä läpi. Sen sijaan testeissä D1–D3 epämagneettisen teräslevyn pinnan suuntaan kulkevien virtakiskojen aiheuttamat lämpötilat olivat huomattavan suuria. Ainoastaan testeissä D4–D6 lasketut lämpötilat ylittivät merkittävästi mitatut lämpötilat, joissa kuparilevyllä suojattiin epämagneettista teräslevyä. Erityinen huomio tehtiin testissä D6, jossa mitatut lämpötilat kuparisuojan alueella eivät kasvaneet taajuuden kasvun mukana. 250 Hz taajuudella suojalevyn lämpötilat olivat pienemmät kuin lämpötilat 166 Hz taajuudella, mikä ei vastaa oletusta siitä, että pyörrevirtahäviöt kasvavat taajuuden funktiona. Magneettikentän tunkeutumissyvyys pienenee taajuuden kasvaessa. Taulukossa 8 on esitetty liitteen 2

taulukon 9 mukaisella kuparin johtavuudella lasketut tunkeutumissyvytydet simuloinneissa käytetyille taajuuksille.

Taulukko 8. Kuparin tunkeutumissyvyys 50, 60, 166 ja 250 Hz taajuuksilla.

Taajuus (Hz)	Tunkeutumissyvyys (mm)
50	10,35
60	9,45
166	5,68
250	4,63

Oletettavasti, tässä tapauksessa 4 mm kuparilevy oli tarpeeksi paksu pienentämään kuparilevyn takana olevan magneettisen teräslevyn häviöitä 250 Hz taajuudella. Taajuuden kasvaessa tunkeutumissyvyys lähestyy suojalevyn paksuutta ja sen myötä pienempi osa magneettivuosta aiheuttaa pyörrevirtoja magneettiseen teräslevyyn. Suojaamattomassa osassa häviöt ja lämpötilat kasvoivat oletuksen mukaan taajuuden kasvaessa. Kuparisuojan lämpötilat näyttivät käyttäytyvän päinvastoin 166 ja 250 Hz taajuuksilla. Huomioin arvoista on, että simuloinnilla lasketut lämpötilat kasvoivat kuparisuojan alueella taajuuden mukana.

Aiemmin lämpötilojen laskennassa käytetyt konvektiokertoimet ovat olleet riittävän hyviä, kun tarkastellut lämpötilat ovat pysyneet muuntajan öljyn jäähdytyksen ansiosta kaapeilla lämpötila-alueella. Tästä johtuen säteilyn suhteellinen osuus ei muuttunut kovin merkittävästi. Säteilyn ja konvektion yhdistäminen on mahdollistanut lämpötilojen suuruusluokan tarkistamisen yksinkertaisella käsinlaskennalla. Ilmajäähdytteisissä osissa säteilyn vaikutus korostuu lämpötilan noustessa ja siksi se otettava huomioon. Nestejäähdytteisissä osissa säteilyn vaikutuksen huomioimattomuus ei aiheuta merkittävää virhettä, sillä nesteet jäähdyttävät tehokkaasti.

8.1 Mahdollisia lämpötilaerojen aiheuttajia

Simulointien yhteydessä pyrittiin selvittämään, mistä erot laskettujen ja mitattujen lämpötilojen välillä johtuivat. Esimerkiksi alumiinilevysuojauksen tapauksessa testattiin useiden eri ominaisuuksien vaikutusta lämpenemään muuttamalla asetuksia ja materiaalien ominaisuuksia. Ensimmäiseksi epäiltiin tunkeutumissyvyyden vaikutusta lämpenemään eli siis sitä, riittääkö käytössä olleen verkotuksen tiheys ottamaan huomioon kappaleen paksuuden vaikutuksen lämpenemään. Tämä osoittautui kuitenkin tutkittujen testien kohdalla merkityksettömäksi. Materiaalien ominaisuuksien osalta varmistettiin myös eri alumiiniseoksien vaikutus. Muuntajissa käytetään enimmäkseen lähes puhdasta alumiinia, mutta toisinaan mekaaniset ominaisuudet vaativat käyttämään seostettuja alumiineja, joissa johtavuus on puhdasta alumiinia alhaisempi. Testikappaleissa käytetyn alumiinin tarkasta seoksesta ei ollut varmuutta, joten simuloinnit suoritettiin useilla erilaisilla alumiiniseoksilla. Niiden vaikutus alumiinilevysuojille laskettuihin lämpötiloihin ei ollut kuitenkaan merkittävä. Niin ikään resistiivisyyden lämpötilariippuvuuden ei havaittu vaikuttavan alumiinisuojiin lämpötiloihin kasvattavasti. Tämä on looginen seuraus, koska resistiivisyyden kasvaessa levyssä kulkevat virrat pienenevät ja siksi tehohäviötkin pienenevät virran neliössä.

Todennäköisesti yksi merkittävä virhetekijä alumiinisuojuille laskettujen lämpötilojen kohdalla on ollut alumiinin alhainen emissiokerroin verrattuna teräksen ja kuparin kerrotimeen. Alumiinin emissiokerroin vaihtelee voimakkaasti riippuen pinnanlaadusta, karheudesta, anodisoinnista, oksidoitumisesta, maalauksesta ja lämpötilasta. Testien perusteella syntyi käsitys, että laskettaessa alumiinilevyn lämpötiloja säteilyn osuutta ei voi sisällyttää konvektiokertoimeen. Säteily pitää määritellä erikseen ja vastaavasti pienentää konvektiokertoimen osuutta lämmönluovutuksessa. Kuparilla oksidoitumisen myötä emissiokerroin kasvaa voimakkaammin kuin alumiinilla ja se voi osaltaan selittää sitä, miksi kuparille lasketuissa lämpenemissä ei tullut yhtä suuria eroja.

8.2 Vaihevälien lämpenemä

Virtakiskojen mennessä läpi magneettisesta teräslevystä syntyi eroa mitattujen ja lasket-
tujen välille kiskojen vaiheväleissä. Ero kasvoi suuremmaksi läpivientiaukon koon kasva-
essa. Tämän selvittämiseksi suoritettiin samoja tutkimuksia kuin alumiinilevysuojauk-
selle. Ne eivät kuitenkaan selittäneet vaihevälien lämpenemäeroja. Simuloinnissa käy-
tettiin magneettista teräslevyä, jonka permeabiliteetti oli määritetty vakioksi 200 H/m,
kuten simulointirutiiniin on kuulunut. Muuntajasimuloinneissa käytetään sydämen
osalta epälineaarista materiaalmääritystä. Muissa teräsrakenteissa permeabiliteettiä on
pidetty vakiona. Todellisuudessa myös tavallisen magneettisen teräksen permeabiliteetti
on epälineaarinen ja sen huomioiminen on välttämätöntä, jotta vuontiheys voidaan las-
kea oikein magneettikentän voimakkuuden vaihdellessa. Epälineaarilla magneettisella
teräksellä lasketut lämpötilat lähestyivät selvästi paremmin mitattuja lämpötiloja. Mag-
neettiselle teräkselle löytyy kirjallisuudesta useita toisistaan poikkeavia B-H-käyriä, joi-
den tulokset poikkesivat merkittävästi toisistaan.

8.3 Jatkokehitys

Tässä työssä on tutkittu lämpötilojen laskennan tarkkuutta erilaisissa tilanteissa. Simu-
lontien yhteydessä tehtyjen testien perusteella laskettujen tulosten tarkkuutta voidaan
parantaa ottamalla huomioon säteilyn vaikutus sekä määrittelemällä magneettisen te-
räksen permeabiliteetti epälineaariseksi. Säteilyn määrittämiseksi tarkemmin pitää sel-
vittää lämpötilan, pinnan laadun sekä pintakäsittelyn vaikutus emissiokertoimeen kulla-
kin pintamateriaalilla.

Sopivan B-H-käyrän määrittäminen adiabaattisten kokeiden avulla parantaisi häviöiden
laskentaa huomattavasti, kun säteilyn ja konvektion vaikutus voidaan sulkea pois. Tällai-
sia kokeita onkin tehty päällystämällä testikappale eristemateriaalilla ja viemällä se tun-
nettuun magneettikenttään käämiin sisälle. Mittaamalla testikappaleen lämpötilan muu-
tos on voitu määrittää siinä syntyvien tehohäviöiden suuruus luotettavasti.

Testikappaleiden lämpöjakaumien tarkastelu lämpökameran avulla mahdollistaisi laajemmat tutkimukset, eikä tutkiminen rajoittuisi vain ennalta määrättyihin rajallisiin pisteisiin. Lisäksi käyttämällä virtauslaskennan sisältäviä simulointiohjelmia konvektion tarkempi huomioinen parantaisi tuloksien tarkkuutta tilanteissa, joissa virtauksia ei voida yksinkertaistaa pelkästään vaaka- ja pystysuorille pinnoille tyypillisiin konvektiokertoimiin.

9 Yhteenveto

Tämän diplomityön tarkoituksena oli vastata seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Antaako käytetty simulointirutiini luotettavia tuloksia lämpenemäkokeiden testeissä?
- Millaisissa tilanteissa simulointirutiini antaa liian pieniä tai suuria lämpötiloja?
- Miten simuloinnilla saatujen lämpötilojen tarkkuutta voidaan parantaa?

Simulointia käytetään apuna muuntajan suunnittelussa liian korkeiden lämpenemien välttämiseksi säiliö- ja tukirakenteissa. Simulointimenetelmän pitää olla riittävän tarkka, että sen pohjalta voidaan tehdä materiaali- ja rakennevalintoja lähellä sallittuja maksimilämpötiloja. Muuntajan rakenteiden lämpenemään vaikuttavat virtajohtimien ja käämien aiheuttamat hajavuot yhtä aikaa, joten niitä tarkastelemalla simulointimenetelmän tarkkuuden arvioiminen on vaikeaa tai jopa mahdotonta, koska häviölähteitä ei voida erottaa toisistaan. Tämän vuoksi tässä työssä simulointiin aiemmin suoritettujen teräskappaleiden lämpenemäkokeet, joiden avulla tarkkuuden arvioiminen on selväpiirteistä ja yksiselitteistä. Mittauksissa oli tutkittu pelkän suurvirtakiskoston hajavuon vaikutusta sen viereen sijoitettujen testikappaleiden lämpötiloihin eri tilanteissa. Mittauksissa käytetyt testikappaleet olivat yksinkertaisia ja testeissä muutettiin vain yhtä muuttujaa kerrallaan, joten niiden avulla voitiin selvittää luotettavasti kunkin muuttujan vaikutus toisistaan riippumatta.

Virtakiskoston aiheuttamat häviöt riippuvat voimakkaasti sähkövirran suuruudesta, etäisyydestä, taajuudesta, materiaaleista, kompensoinnista ja kappaleiden suunnista, joten pienellä muutoksella voi olla merkittävä vaikutus lämpötiloihin. Työn aikana selvitettiin, missä tilanteissa lasketut lämpötilat vastaavat mitattuja lämpötiloja. Tulosten avulla pyrittiin myös selvittämään merkittävimpiä erojen aiheuttajia laskettujen ja mitattujen lämpötilojen välille. Tulosten tarkkuuden parantamiseksi suoritettiin simuloiteja useilla eri asetuksilla ja materiaaliominaisuuksilla. Näiden simulointien yhteydessä selvisi, että

tarkkuutta voidaan parantaa merkittävästi ottamalla säteilyn vaikutus huomioon sekä määrittelemällä magneettisen teräksen permeabiliteetti epälineaarisesti. Tämän työn simuloinneissa selvitettiin ainoastaan, millä määrittelyillä ja asetuksilla simulointitulokset lähestyvät mittaustuloksia, joten sopivien asetusten määrittäminen kussakin tilanteessa edellyttää kuitenkin lisätutkimuksia.

Käytössä ollut simulointimenetelmä antoi liian matalia lämpötiloja magneettisen teräslevyn ollessa alumiinilevyllä suojattuna sekä virtakiskojen mennessä magneettisesta teräslevystä läpi. Lisäksi kuparilevyn toimiessa epämagneettisen teräslevyn suojana laskeettiin mitattuihin nähden korkeampia lämpötiloja. Tapauksissa, joissa virtakiskot olivat suojaamattomien testikappaleiden kanssa samansuuntaisia, laskentatarkkuus osoittautui verrattain hyväksi tutkituilla sähkövirran suuruuksilla, taajuuksilla ja eri etäisyyksillä.

Lähteet

- ABB (2004). Transformer Handbook. 2. painos. Zürich: ABB Power Technologies Management Ltd., Transformers. 212 s.
- ABB (2008). Best practice guide for the use of infolytica softwares MagNet and ThermNet in power transformer simulations. Technical Standard. Julkaisematon. ABB oy. 36 s.
- Dits, Ilkka (2010). Tehomuuntajan epämagneettisten metalliosien lämpeneminen suurvirtajohtimien läheisyydessä. Vaasan ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikka. Opinnäytetyö. 98 s.
- Edminister, Joseph A. & Mahmood Nahvi-Dekhordi (2011), Electromagnetics. 3. painos. New York etc. McGraw-Hill. 354 s. Schaum's Outline Series. ISBN 978-0-07-163235-5
- Edwards J D (2015), Introduction to electromechanics. Siemens. Saatavilla: <https://support.sw.siemens.com/kbassets/external/MG602373/files/Em1415IntroElectromech.pdf>
- Elovaara, Jarmo & Liisa Haarla (2011). Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto. 551 s.
- Heinonen, Janne (2006). Tehomuuntajan rautaosien lämpeneminen suurvirtajohtimien läheisyydessä. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. 156 s.
- Inropera, Frank P, David P. Dewitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine (2011). Fundamentals of mass and heat transfer. 7. Painos. New York: John Wiley & Sons. 1048 s. ISBN: 978-0470-50197-9
- Jaakkola, Pauli (2014). Termodynamiikan perusteet. [Online] Luentomoniste. Tampereen teknillinen yliopisto. [12.3.2020] Saatavissa: <http://www.students.tut.fi/~jaakkol4/ltpplusplus/opintomonisteet/termodyna miikka.pdf>
- Mikron. Table of emissivity of various surfaces. Transmetra Haltec GmbH. [Viitattu 12.4.2020]. Saatavissa: <http://www->

eng.lbl.gov/~dw/projects/DW4229_LHC_detector_analysis/calculations/emissivity2.pdf

Siemens (2022). Simcenter MAGNET – Perform low frequency electromagnetic field simulations [Online]. Siemens. [Viitattu 5.2.2022]. Saatavissa: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/simcenter/magnet.html>

Sihvola, Ari & Ismo Lindell. 2013. Sähkömagneettinen kenttäteoria 2. Dynaamiset kentät. 5. painos. Otatieto. 200 s.

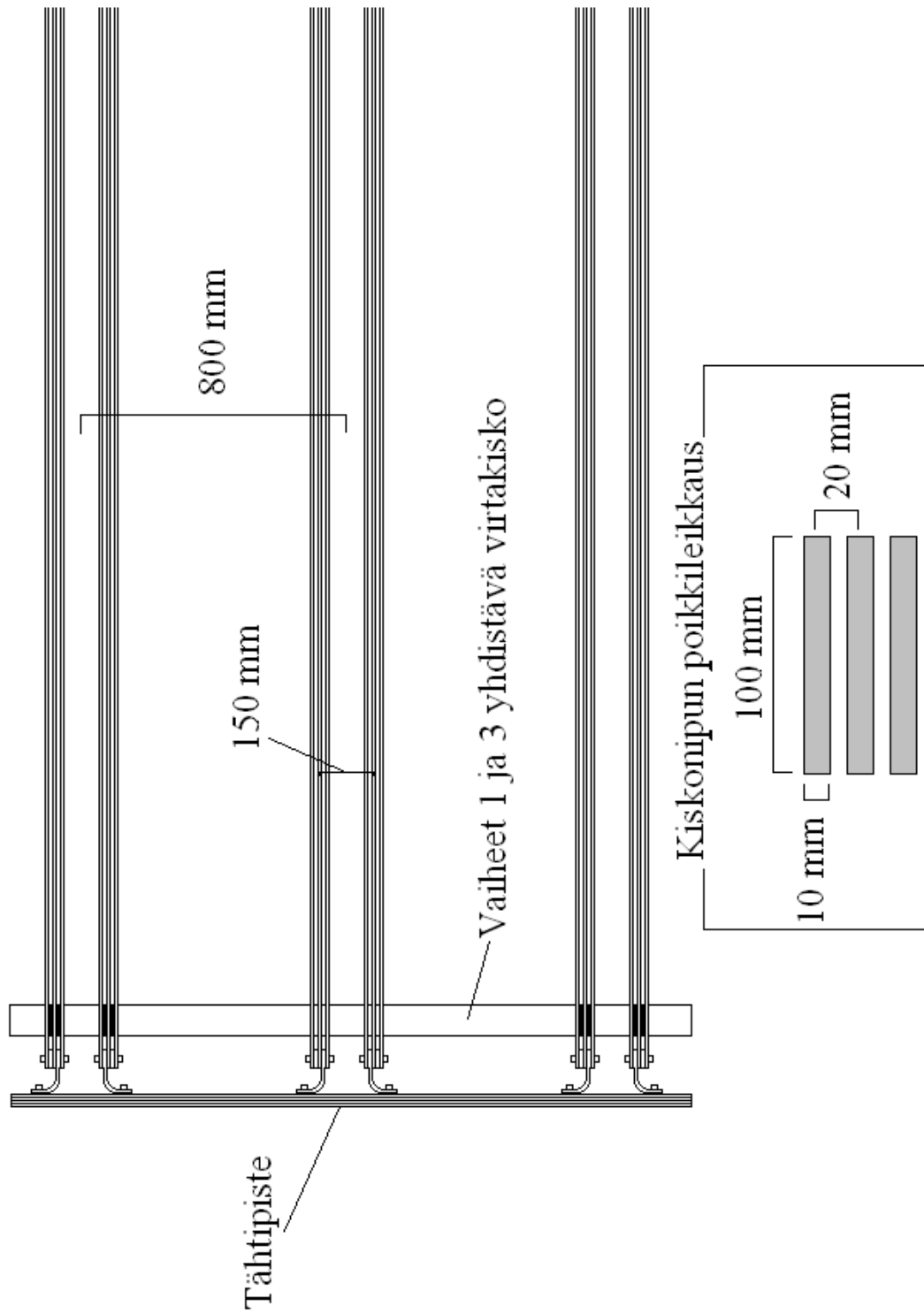
Verkkonen, Vesa (2005). Sähkökoneet – Muuntajat. Luentomoniste. Vaasa ammattikorkeakoulu. 143 s.

Viljanen, Ari (2007). Elektrodynamiikka – Magneettikenttä väliaineessa [Online]. Luentomoniste. [Viitattu 4.5.2019]. Saatavissa: http://space.fmi.fi/~viljanea/ed2008/ED2007_06.pdf

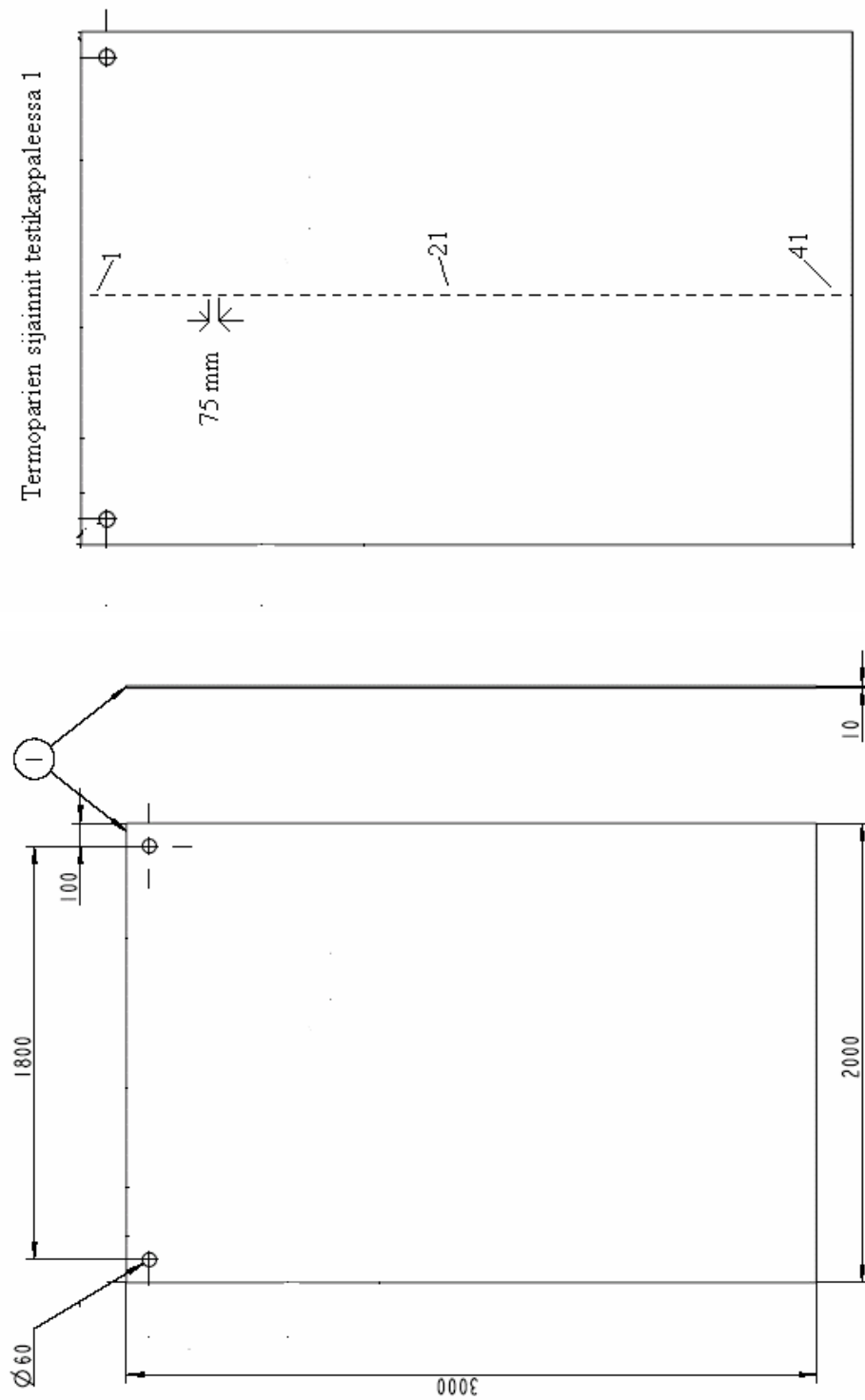
Young, Hugh D. & Roger A. Freedman (2004) University Physics. 11th edition. Addison Wesley. 1714 s.

Liitteet

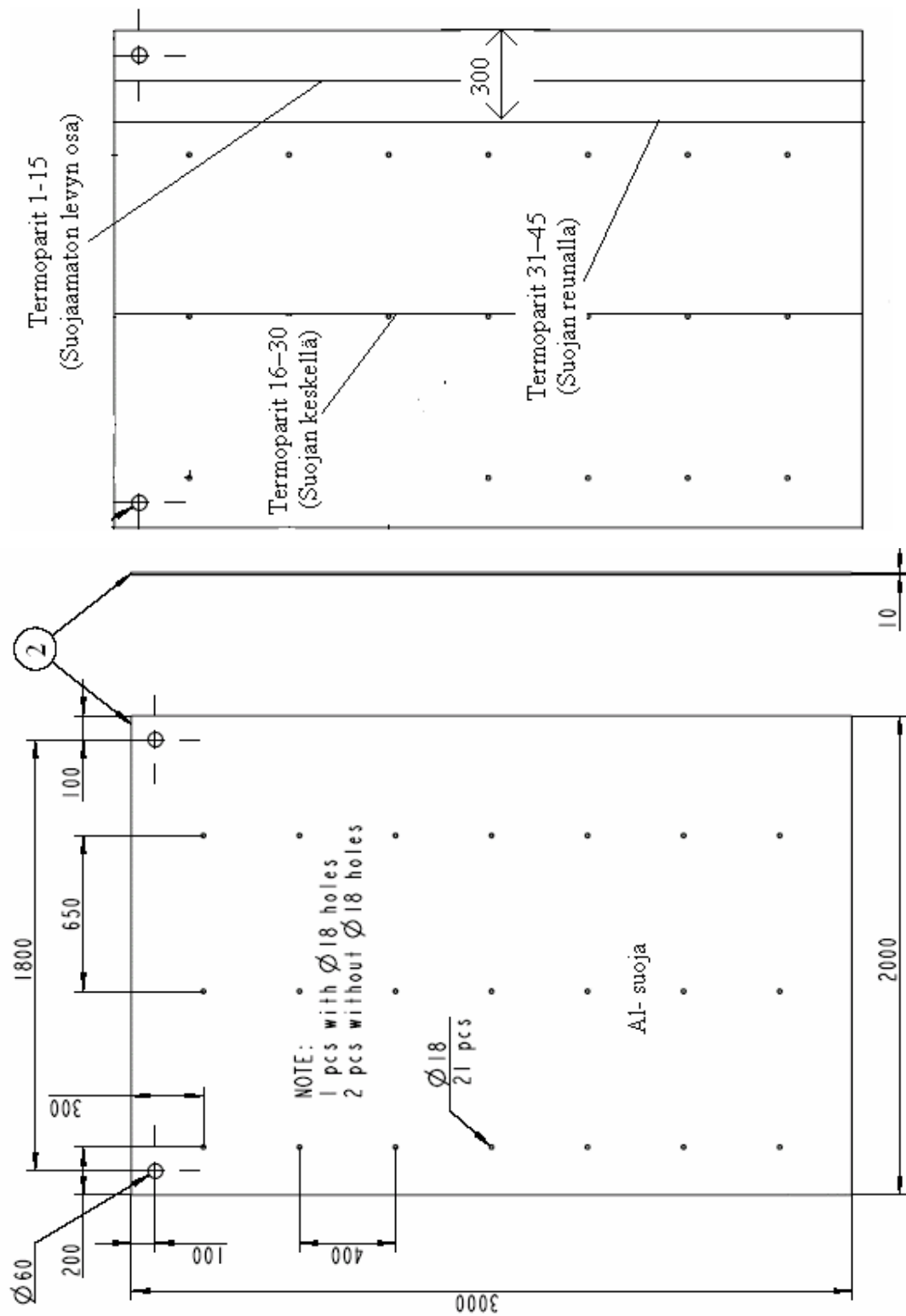
Liite 1. Virtakiskojen ja testikappaleiden kuvat.



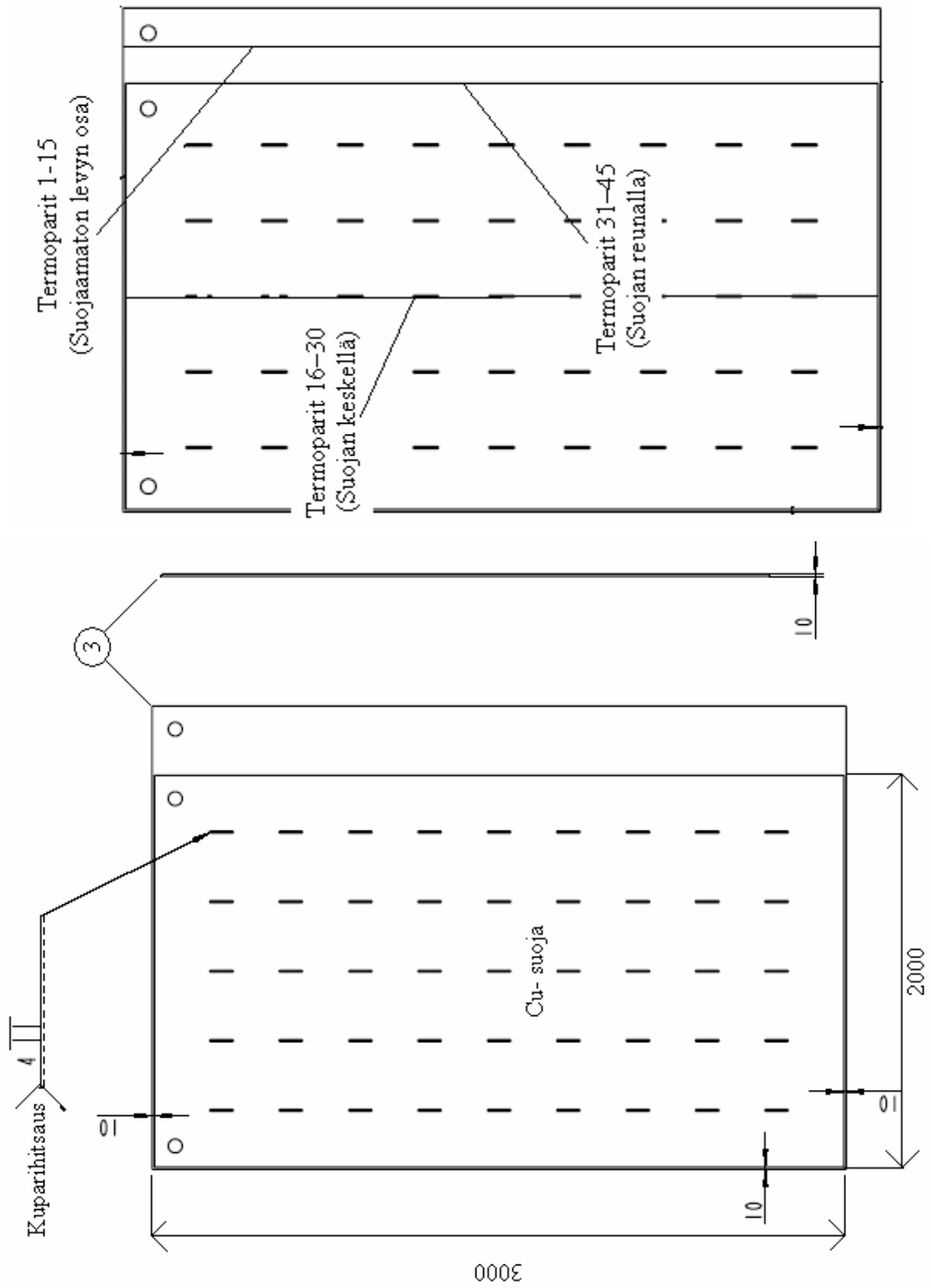
Kuva 80. Virtakiskot.



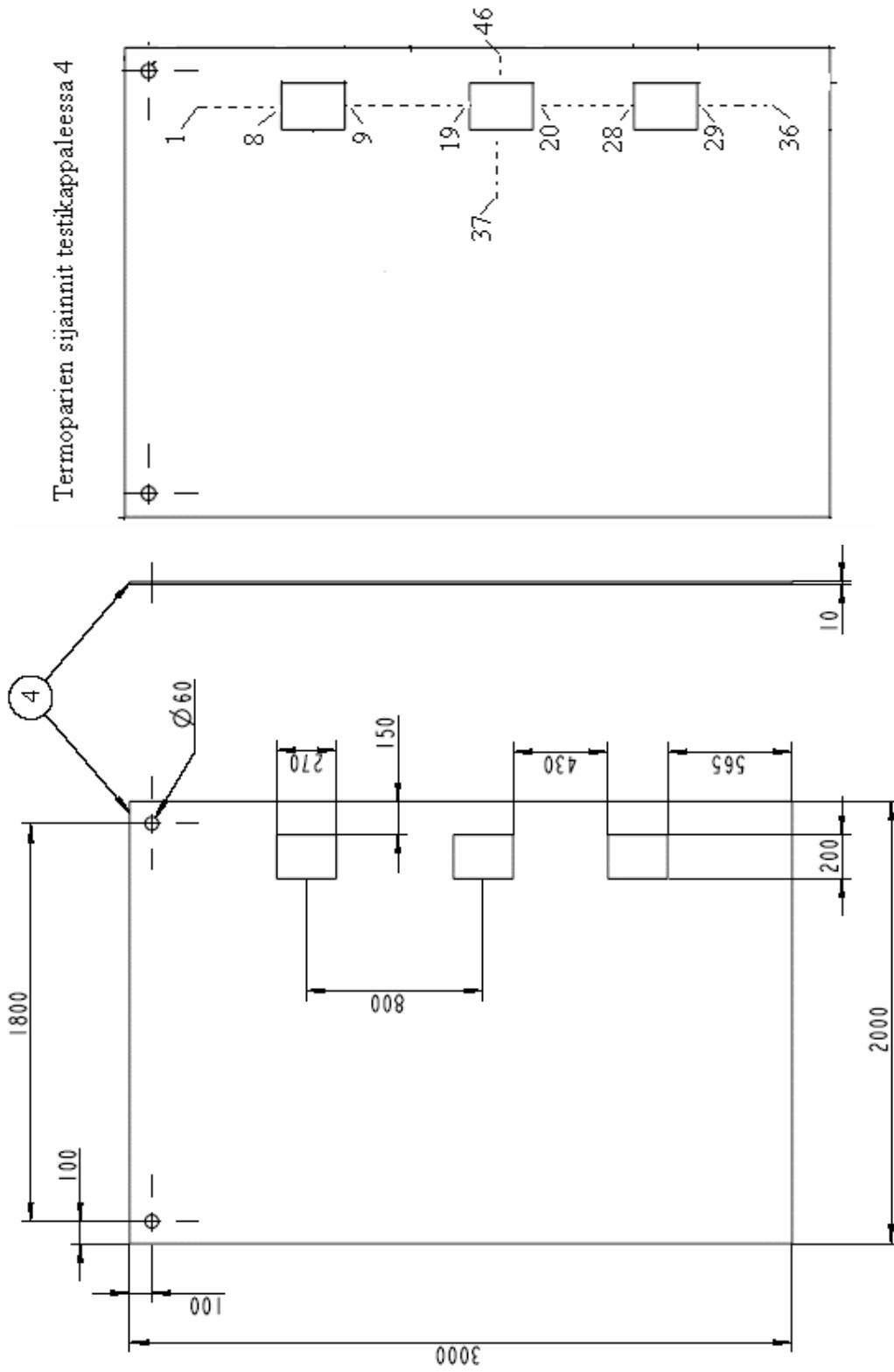
Kuva 81. Testikappale 1.



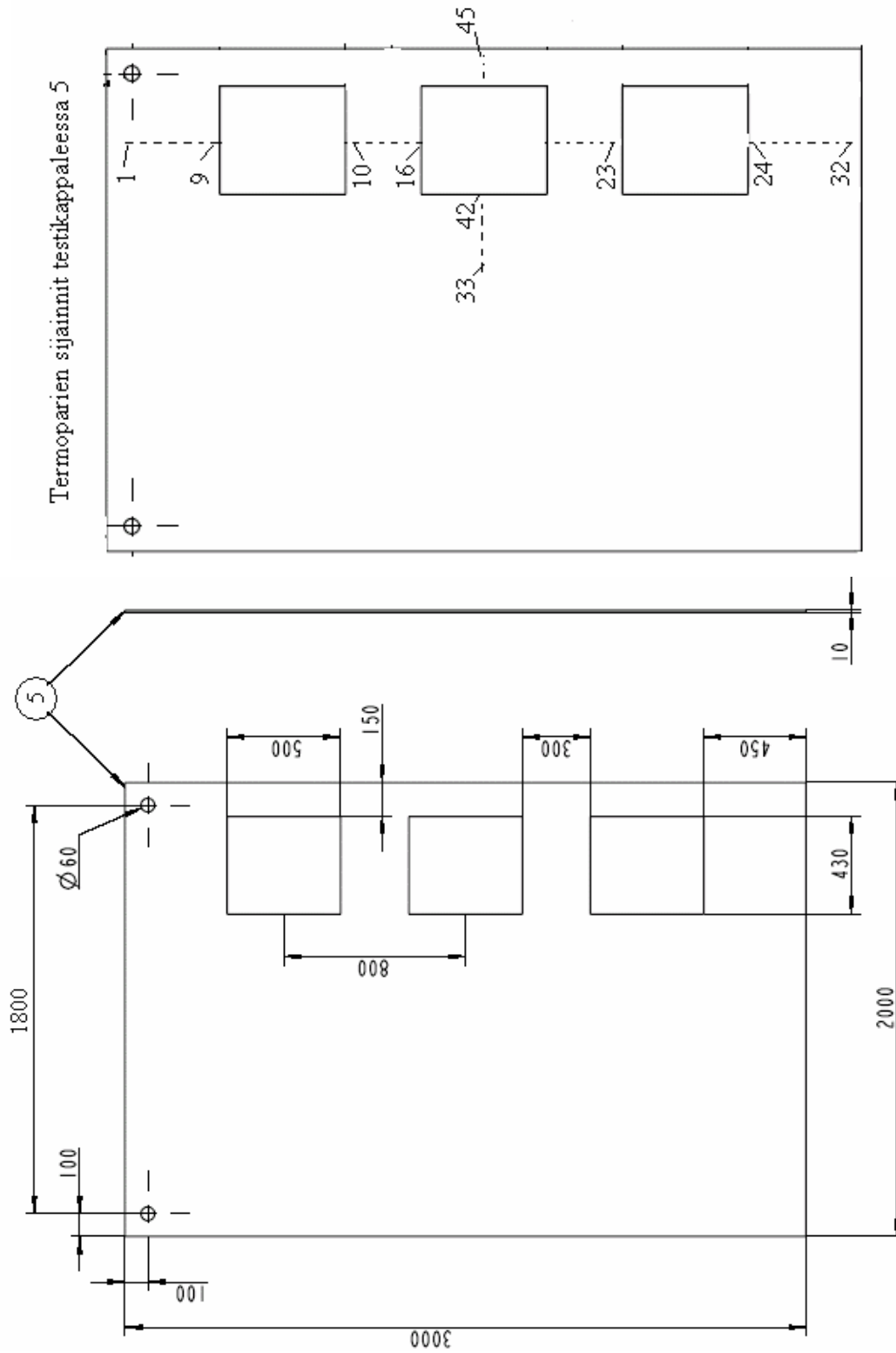
Kuva 82. Testikappale 2.



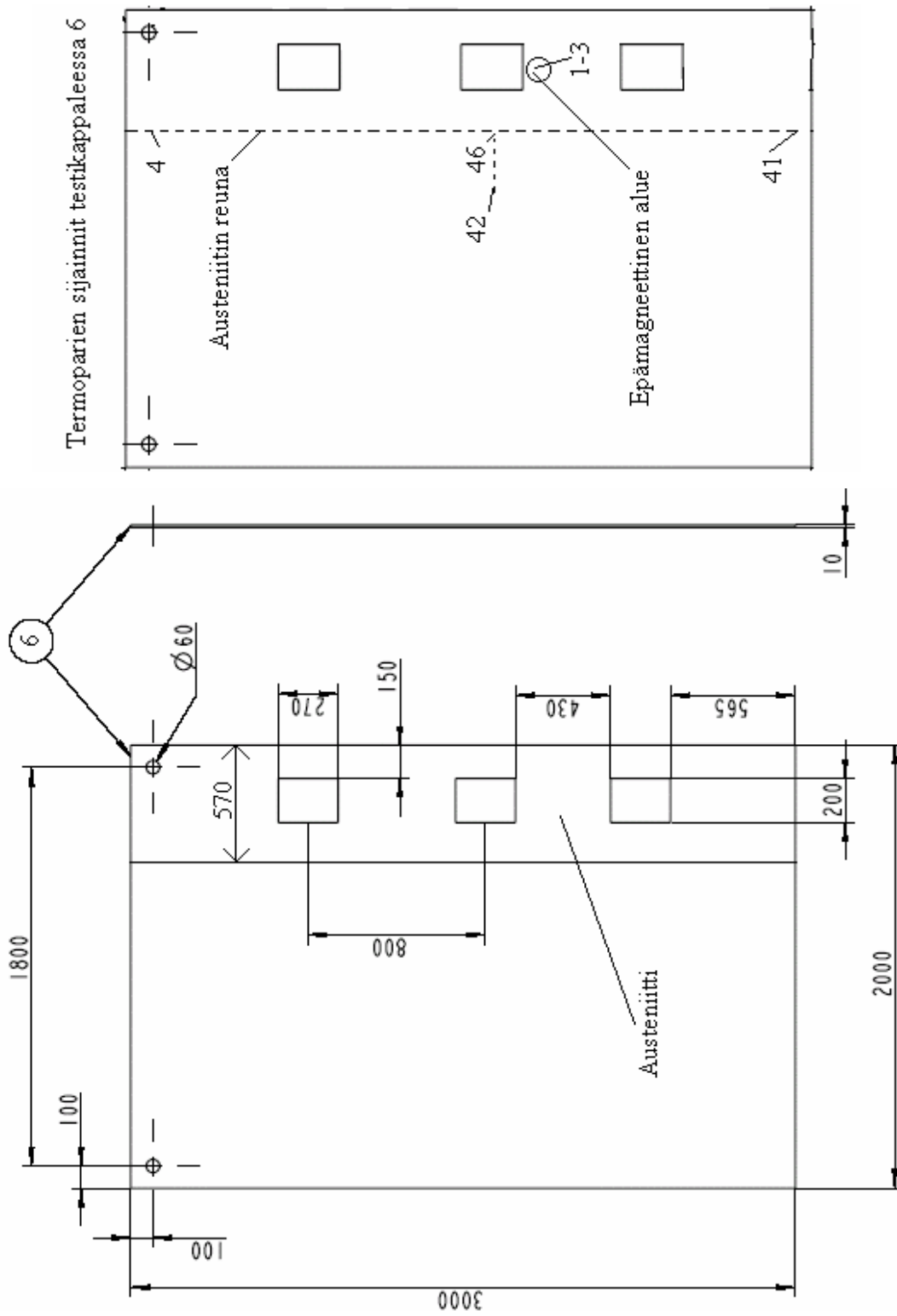
Kuva 83. Testikappale 3.



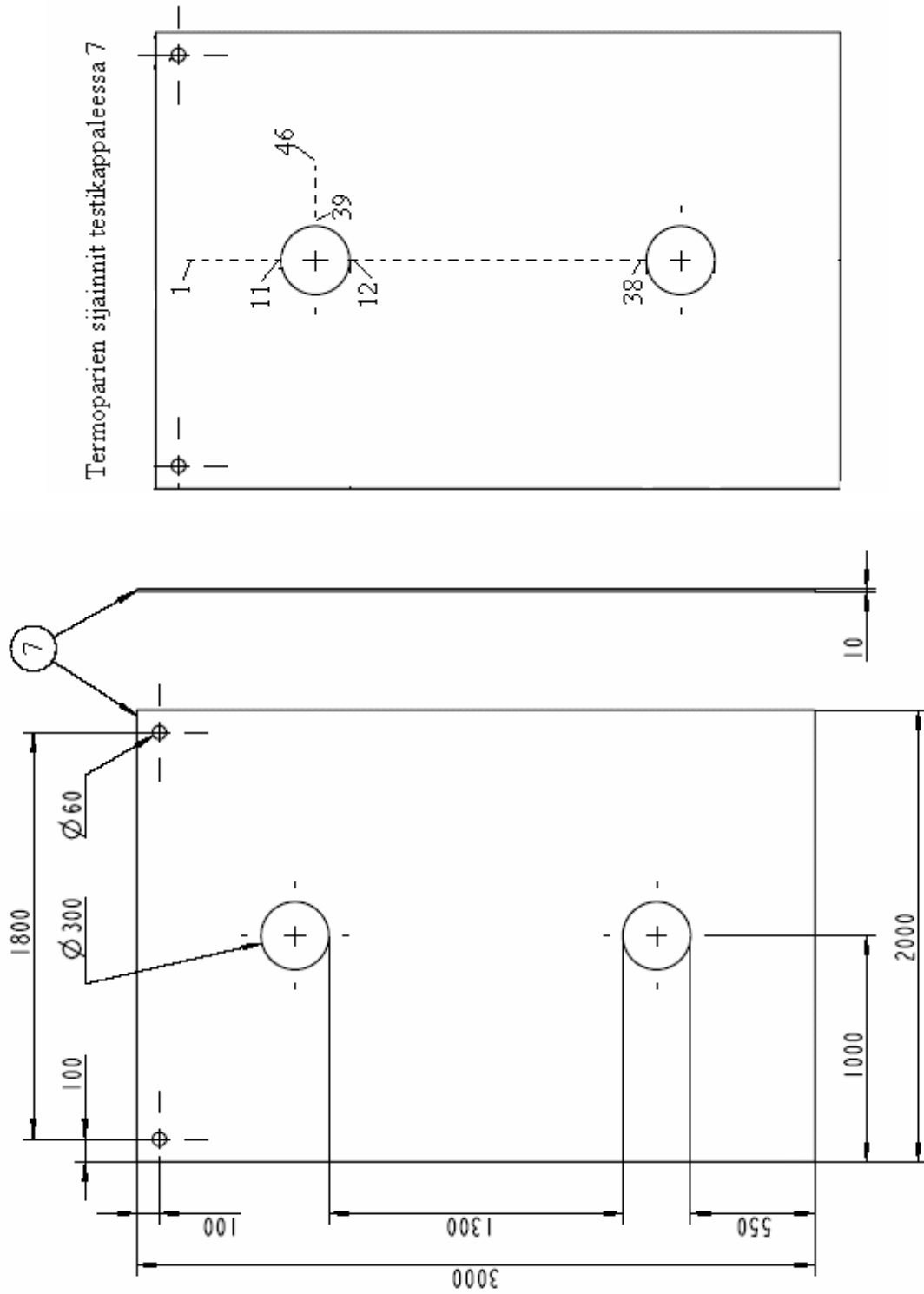
Kuva 84. Testikappale 4.



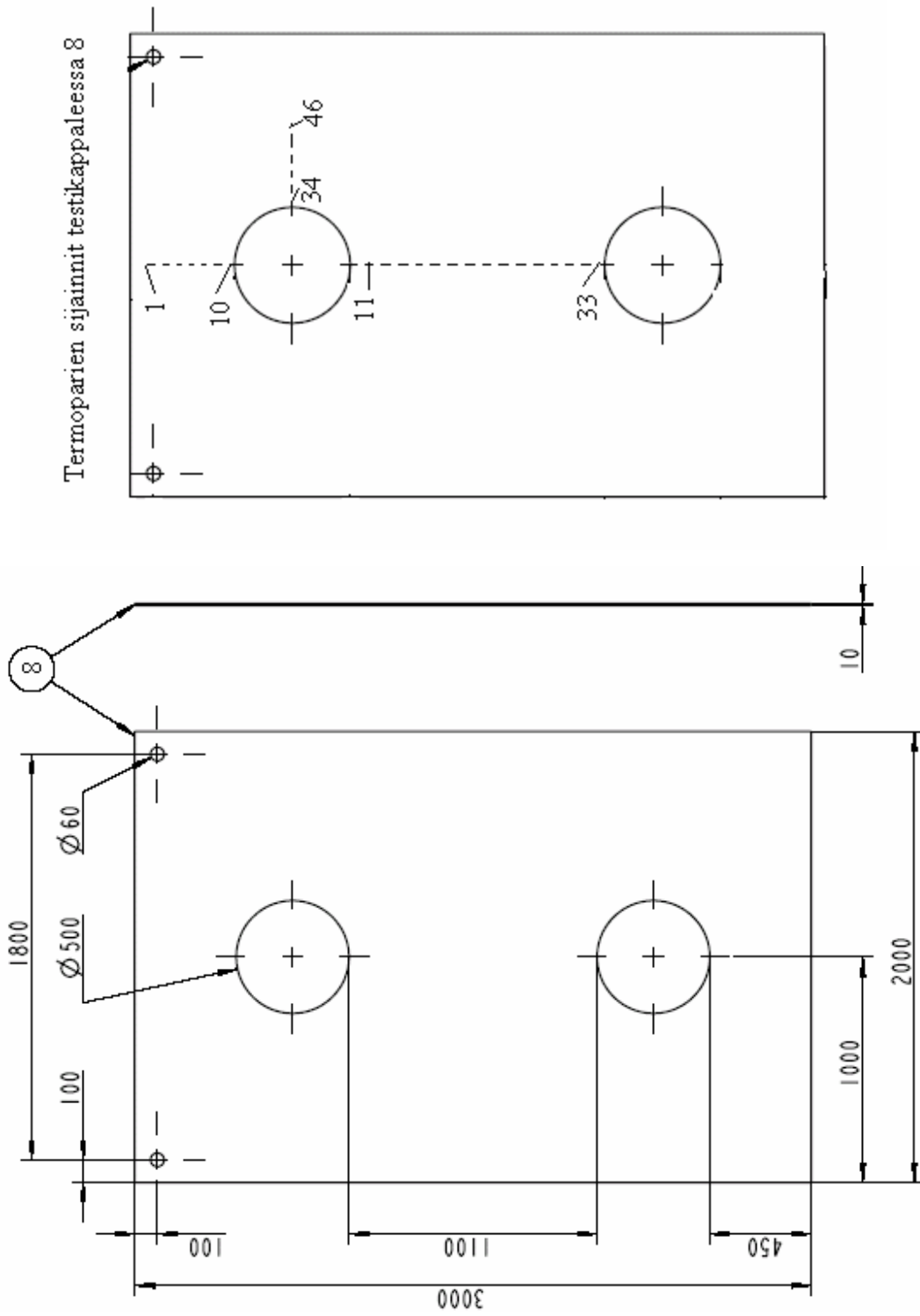
Kuva 85. Testikappale 5.



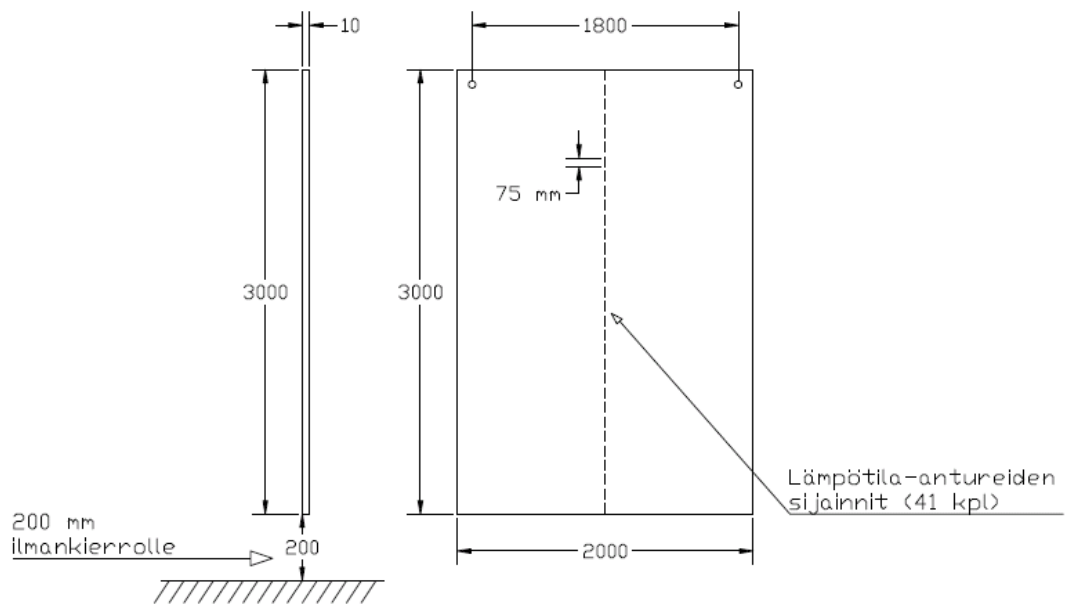
Kuva 86. Testikappale 6.



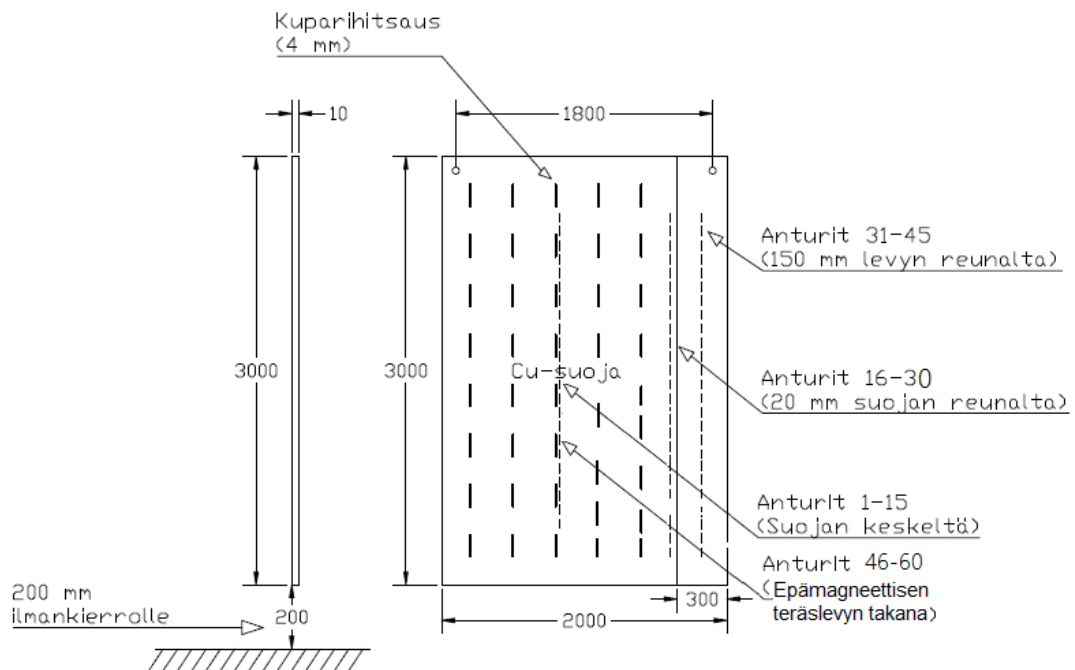
Kuva 87. Testikappale 7.



Kuva 88. Testikappale 8.



Kuva 90. Testikappale D1.



Kuva 91. Testikappale D2.

Liite 2. Simuloinnissa käytettyjen materiaalien ominaisuudet.

Taulukko 9. Materiaalien ominaisuudet.

Materiaali	Ilma	Magneettinen teräs	Epämagneettinen teräs	Kupari	Alumiini
Nimitys	Air	MagnSteel_ABB75	Stainless_Steel_Hasse	Copper75	Alu_modified
Johtavuus [S/m]	0	5 338 677	1650 000	47 303 690	30 000 000
Tiheys [kg/m ³]	1,2	7850	7800	8933	2707
Suhteellinen permeabiliteetti	1	200	1	1	1
Lämmön johtavuus [W/(m·K)]	0,025	50	17	393	160
Ominaislämpökapasiteetti [J/(kg·K)]	1056	470	500	397	896

Magneettisen teräksen ja kuparin arvot 75 °C lämpötilassa. Muiden materiaalien arvot 20 °C lämpötilassa.

Taulukko 10. Ilman dynaaminen viskositeetti.

Lämpötila [°C]	dynaaminen viskositeetti [kg/(m·s)]
-173	$6,92 \cdot 10^{-6}$
-123	$1,03 \cdot 10^{-5}$
-73	$1,33 \cdot 10^{-5}$
-23	$1,60 \cdot 10^{-5}$
27	$1,86 \cdot 10^{-5}$
77	$2,08 \cdot 10^{-5}$
127	$2,29 \cdot 10^{-5}$
177	$2,48 \cdot 10^{-5}$
227	$2,67 \cdot 10^{-5}$
277	$2,85 \cdot 10^{-5}$
327	$3,02 \cdot 10^{-5}$
377	$3,18 \cdot 10^{-5}$
427	$3,33 \cdot 10^{-5}$
477	$3,48 \cdot 10^{-5}$
527	$3,63 \cdot 10^{-5}$
577	$3,77 \cdot 10^{-5}$
627	$3,90 \cdot 10^{-5}$
677	$4,02 \cdot 10^{-5}$
727	$4,15 \cdot 10^{-5}$
827	$4,44 \cdot 10^{-5}$
927	$4,69 \cdot 10^{-5}$
1027	$4,93 \cdot 10^{-5}$
1127	$5,17 \cdot 10^{-5}$
1227	$5,40 \cdot 10^{-5}$
1327	$5,63 \cdot 10^{-5}$
1427	$5,85 \cdot 10^{-5}$
1527	$6,07 \cdot 10^{-5}$
1627	$6,29 \cdot 10^{-5}$
1727	$6,50 \cdot 10^{-5}$
1827	$6,72 \cdot 10^{-5}$
1927	$6,93 \cdot 10^{-5}$
2027	$7,14 \cdot 10^{-5}$
2127	$7,35 \cdot 10^{-5}$
2227	$7,57 \cdot 10^{-5}$