



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUKKA VIHTAKARI
NBTI-SUPRAJOHDEMAGNEETTIEN MEKAANINEN JÄÄH-
DYTYS

Diplomityö

Tarkastaja: Lehtori Risto Mikkonen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 9.12.2015

TIIVISTELMÄ

JUKKA VIHTAKARI: NbTi-suprajohdemagneettien mekaaninen jäähdytys

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 93 sivua, 9 liitesivua

huhtikuu 2016

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Pääaine: Vaihtoehtoiset sähköenergiateknologiat

Tarkastajat: Lehtori Risto Mikkonen

Avainsanat: Kryojäähdytin, lämmönjohtavuus, MRI, NbTi, pyörrevirta, suprajohdemagneetti

Suprajohtavuus (aineiden kyky johtaa sähkövirtaa häviöttömästi) mahdollistaa monenlaisia sovelluksia, kuten vahvoja magneettikenttiä tuottavat suprajohtavat magneetit. Vahvoja magneettikenttiä tarvitaan esimerkiksi magneettikuvauslaitteissa.

Kaikki tunnetut suprajohteet vaativat alhaisen toimintalämpötilan ja esimerkiksi käytetyin suprajohdemateriaali, niobititaani, saavuttaa suprajohtavan tilan vasta alle 9,3 K lämpötilassa. Tästä johtuen suprajohdesovellukset vaativat tehokasta jäähdytystä ja yleisimmin käytetty jäähdytysmenetelmä on kohteen asettaminen nestemäiseen heliumiin kryostaatin (lämpöeristetty astia) sisällä. Helium on kuitenkin kallista, joten jonkin vaihtoehtoisen jäähdytysmenetelmän käyttö voisi olla taloudellisesti järkevää. Yksi vaihtoehto on mekaaniset kryojäähdyttimet, jotka eivät vaadi nestemäisiä jäähdytysnesteitä toimiakseen.

Tässä työssä selvitettiin kolmen WIC-johtimista (Wire-In-Channel) valmistetun testikäämin termodynaamista käyttäytymistä. Johtimet on valmistanut Luvata Oy ja niitä olisi luultavasti mahdollista käyttää esimerkiksi kryojäähdyttimellä jäähdytyksessä magneeteissa. Kyseiset johtimet oli eristetty eri materiaaleilla; yksi oli eristämätön, toinen päällystetty sukkamaisella PET-eristeellä ja kolmas ohuella lakkapinnoitteella. Lämmönjohtavuus on tärkeä suure, koska se vaikuttaa olennaisesti käämien toimintaan, kuten vaadittuun jäähdytystehoon tietyssä toimintalämpötilassa ja magneetin suojaukseen häiriötilanteilta. Toisaalta eristys voi auttaa eliminoimaan käämeissä mahdollisesti syntyviä pyörrevirtoja, jotka voivat aiheuttaa ylimääräisiä häviöitä ja häiriöitä magneetin toiminnalle. Käämeille mallintamalla saadut pysty-akselin suuntaiset lämmönjohtavuudet 12 K:ssä olivat: 0,63 W/mK PET-eristetyille, 6,1 W/mK eristämättömälle ja 3,9 W/mK lakkaeristetyille.

ABSTRACT

JUKKA VIHTAKARI: Mechanical cooling of NbTi superconducting magnets

Tampere University of Technology

Diplomityö, 93 pages, 9 Appendix pages

April 2016

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Alternative electrical engineering

Examiner: Lecturer Risto Mikkonen

Keywords: Cryocooler, MRI, NbTi, eddy currents, superconducting magnet, thermal conductivity

Superconductivity (the ability of a material to conduct current without losses) enables applications that would not be possible without it. For example, strong magnetic fields are only achieved with superconducting magnets. Superconducting magnets are used in many different applications, but the most economically meaningful is the magnetic resonance imaging.

To achieve superconducting state, all known superconducting materials require temperatures that are below the room temperature, and the most used material, niobium-titanium becomes superconducting only below 9,3 K. The low operating temperature requires strong cooling, which is usually accomplished with liquid helium at 4,2 K. Helium is, however, expensive so alternative cooling method could be practical. One possible solution is the use of mechanical cooling (cryocoolers), which does not require liquid coolants to operate.

This thesis examines the thermal conductivity of three test magnets that are wound from different Wire-In-Channel conductors. These conductors are manufactured by Luvata Oy and they are possibly planned to be used in cryocooled magnets. One of the magnets is made from conductor that has PET insulation around the wire, other has thin lacquer insulation and the last one has no insulation. Thermal conductivity of a magnet is important because it affects many different aspects of the magnets operation. For example, it determines how much cooling power is required to achieve certain temperature and how well magnet can conduct undesirable heat away from the system. The thermal conductivity along vertical axis for the test magnets at 12 K were: 0,63 W/mK for the PET insulated, 6,1 W/mK for the uninsulated and 3,9 W/mK for the lacquer insulated.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Sähkötekniikan laitoksella yhteistyössä Luvata Oy:n kanssa. Haluan kiittää lehtori Risto Mikkosta työn tarkastamisesta, ohjaamisesta sekä muusta avusta työn aikana. Mielenkiintoisen aiheen tarjoamisesta ja mahdollistamisesta haluan kiittää Mikkosen lisäksi Luvata Oy:n Jukka Somerkoskea.

Työn mittausosio ei olisi onnistunut ilman Joonas Järvelän ammattitaitoa ja osaamista, joten myös suuri kiitos hänelle. Järvelälle kiitos myös kaikesta muusta avusta työn aikana. Kiitos myös Valtteri Lahtiselle avusta pyörrevirtamallinnuksen toteuttamisessa.

Viimeiseksi haluan kiittää perhettäni kaikesta tuesta vuosien varrella. Erityisesti kiitos vanhemmilleni koko elämän aikaisesta kannustuksesta ja avusta.

Tampereella 20.4.2016

Jukka Vihtakari

SISÄLLYS

1. Johdanto	1
2. Suprajohtavan magneetin jäähdytysvaihtoehdot	3
2.1 Kryostaatin rakenne ja lämpökuorma	4
2.2 Nestejäähdytys	7
2.3 Mekaaninen jäähdytys	8
2.3.1 Kryojäähdytin	9
2.3.2 Nykyiset kryojäähdyttimet	11
2.4 Jäähdytyksen hyötysuhde ja kustannukset	14
2.5 Lämpötilan vaikutus johdinkustannuksiin	17
3. Magneettikuvaus ja MRI-magneetti	20
3.1 Magneettikuvaus	20
3.1.1 Magnetisaatio ja prekessio	21
3.1.2 Muuttuva magneettikenttä ja relaksaatio	22
3.1.3 Signaalin havaitseminen ja kuvan tuottaminen	25
3.2 MRI-laitteen rakenne	27
3.2.1 Päämagneetti	29
3.2.2 Gradienttikäämit	30
3.2.3 RF-järjestelmä	31
3.3 MRI-magneetin mekaaninen jäähdytys	32
3.4 Muut mekaanisen jäähdytyksen sovelluskohteet	33
4. Koejärjestely ja magneettien lämpöverkkomallit	35
4.1 Koekäämit	35
4.2 Käämien rakenne	37
4.3 Kryogeeninen interface ja koejärjestely	40
4.4 Käämien anturit ja lämmitin	43

4.5	Mittaukset	44
4.6	Testattavien käämien lämpöverkkomallit	46
4.6.1	Mallinnusohjelma ja käytetyt yhtälöt	47
4.6.2	Mallien rakenne	48
5.	Pyörrevirrat ja niiden generoima lämpö	58
5.1	RF-käämin vaikutus suprajohtavaan pääkäämiin	58
5.2	Pyörrevirtojen indusoituminen ja generoitunut lämpö	59
5.3	Pyörrevirtamalli	60
6.	Mittaus- ja mallinnustulokset	63
6.1	Mittaukset epoksikerroksen kanssa	63
6.2	Mittaukset ilman epoksikerrosta	63
6.2.1	Käämi 1	63
6.2.2	Käämi 2	67
6.2.3	Käämi 3	69
6.3	Mallien tulokset	72
6.3.1	Lämmönjohtavuus	72
6.3.2	Pyörrevirrat	74
7.	Tulosten analysointi	76
7.1	Mittaustulosten vertailu	76
7.1.1	Käämien jäähdytys ja aikavakiot	76
7.1.2	Lämmitysmittaukset	78
7.1.3	Pulssimittaukset	79
7.2	Käämien lämmönjohtavuudet	81
7.3	Pyörrevirtojen vaikutukset	83
7.4	Johtopäätökset	84
8.	Virhearvio	87
8.1	Mittaukset	87

8.2 Lämmönjohtavuusmallinnus	87
8.3 Pyörrevirtamallinnus	89
9. Yhteenveto	90
Lähteet	94
Liite A. Mittaustulokset epoksikerroksen kanssa	102
Käämi 1	102
Käämi 2	105
Käämi 3	108

KUVALUETTELO

2.1	Kryostaatin poikkileikkaus.	4
2.2	GM-kryojäähdytin.	10
2.3	GM-jäähdytysteho.	12
2.4	Jäähdytyksen kustannukset kompressorin tehon funktiona.	15
2.5	Suprajohteiden kriittinen pinta.	18
3.1	Magnetisaation prekessio.	22
3.2	M:n kärjen paikka relaksaation aikana kun se aluksi prekessoi xy-tasossa.	23
3.3	π nutaatio.	25
3.4	Magneettisen momentin synnyttämä jännite.	26
3.5	Gradientin suuruuden ja RF-pulssin taajuuden vaikutus magneettikuvan muodostamiseen.	27
3.6	Magneettikuvauslaitteen rakenne.	28
3.7	Magneettikuvauslaitteen poikkileikkaus.	29
3.8	INUMAC-kuvauslaitteen rakenne.	30
3.9	Gradienttikäämit.	31
3.10	Lintuhäkkikäämi.	32
3.11	MrOpen magneettikuvauslaite.	33
4.1	WIC-johtimen poikkileikkaus.	36
4.2	PET-eristetyn johtimen poikkileikkaus.	37

4.3	Eristämättömän johtimen poikkileikkaus.	38
4.4	Lakkaeristetyn johtimen poikkileikkaus.	38
4.5	Koemaagneetin rakenne.	39
4.6	Koemaagneetin poikkileikkaus.	40
4.7	Kryostaatin sisäosat.	41
4.8	Kryostaatti ilman ulkokuorta ja sen kanssa.	42
4.9	Tyypillinen mitatun lämpötilan virhe CX-1050 sensorille ulkoisessa magneettikentässä toimittaessa lämpötiloissa 2,03–286 K.	43
4.10	Antureiden ja lämmittimen sijoittelu koemagneetissa.	45
4.11	Pienistä tangoista mitattu lämmönjohtavuus Stycast 2850FT-epoksille.	49
4.12	Kuparin lämmönjohtavuus eri RRR-arvoilla.	50
4.13	Työssä käytettyjä lämmönjohtavuuksien arvoja.	51
4.14	Laskennassa käytetty yksikkökoppi.	53
4.15	PET-eristetyn magneetin aksiaalisymmetrinen mallinnusalue.	55
4.16	Mallinnetun magneetin yksi lämpötilajakauma.	56
5.1	Mallinnetut johtimet sekä magneettivuon tiheys.	61
6.1	Koemagneetin 1 antureiden lämpötilat jäädytyksen aikana ilman epoksikerrosta.	64
6.2	Koemagneetin 1 askelvaste ilman epoksikerrosta.	64
6.3	Koemagneetin 1 antureiden lämpötilat lämmittimen tehon funktiona ilman epoksikerrosta.	65
6.4	Koemagneetin 1 antureiden lämpötilat lämpöpulssien aikana ilman epoksikerrosta.	66

6.5 Koemagneetin 2 antureiden lämpötilat jäädytyksen aikana ilman epoksikerrosta.	67
6.6 Koemagneetin 2 askelvaste ilman epoksikerrosta.	67
6.7 Koemagneetin 2 antureiden lämpötilat lämmittimen tehon funktiona ilman epoksikerrosta.	68
6.8 Koemagneetin 2 antureiden lämpötilat lämpöpulssien aikana ilman epoksikerrosta.	69
6.9 Koemagneetin 3 antureiden lämpötilat jäädytyksen aikana ilman epoksikerrosta.	70
6.10 Koemagneetin 3 askelvaste ilman epoksikerrosta.	70
6.11 Koemagneetin 3 antureiden lämpötilat lämmittimen tehon funktiona ilman epoksikerrosta.	71
6.12 Koemagneetin 3 antureiden lämpötilat lämpöpulssien aikana ilman epoksikerrosta.	72
6.13 Käämin 2 antureiden A ja B mitatut sekä mallinnetut lämpötilat lämmittimen tehon funktiona.	73
6.14 Käämin 2 antureiden A ja B lämpötilaero lämmittimen tehon funktiona.	73
6.15 Mallinnetut lämmönjohtavuudet PET-eristetyille käämille.	74
6.16 Mallinnetut lämmönjohtavuudet eristämättömälle käämille.	74
6.17 Mallinnetut lämmönjohtavuudet lakkaeristetyille käämille.	74
6.18 Pyörrevirtojen aiheuttamat häviöt eristeen paksuuden funktiona.	75
7.1 Koemagneettien B-anturin lämpötilat jäädytyksen aikana ilman epoksikerrosta.	77
7.2 Koemagneettien anturin B lämpötilat lämmittimen tehon funktiona epoksikerroksen kanssa.	78

7.3	Koemagneettien anturin B lämpötilat lämmittimen tehon funktiona ilman epoksikerrosta.	79
7.4	Koemagneettien anturin B lämpötilan muutos magneettiin siirretyn energian funktiona epoksikerroksen kanssa.	80
7.5	Koemagneettien anturin B lämpötilan muutos magneettiin siirretyn energian funktiona ilman epoksikerrosta.	80
7.6	Käämien johdinosien mallinnetut z-suuntaiset lämmönjohtavuudet. . .	81
7.7	Käämien johdinosien mallinnetut r-suuntaiset lämmönjohtavuudet. . .	82
7.8	Mallinnetut lämpötilagradientit käämissä 1 lämmittimen teholla 0 W. .	82
7.9	Käämien A- ja B-antureiden lämpötilaero lämmittimen tehon funktiona epoksikerroksen kanssa ja ilman.	85
8.1	A- ja B-antureiden mallista saatujen sekä mitattujen arvojen erotuksen virhe.	89

TAULUKKOLUETTELO

2.1	Kryonesteiden ominaisuuksia [22, s. 27].	7
2.2	Kryojäädyttimien parametreja. PT415 ja RDK-415D sisältää kaksi kylmäpäättä, ja melu on ilmoitettu kompressorille [11, 12, 13, 68, 69].	13
2.3	Kryojäädyttimien kompressorien tehot [12, 13, 66].	13
2.4	Jäädytyksen laatuluku ideaalitapauksessa lämpötilan 300 K ja T_c välillä [45].	14
2.5	Kryonesteiden hintoja [45, s. 42].	16
2.6	Johtimien ϵ/kAm arvoja [43, ss. 30–31].	19
3.1	Arvioituja relaksaatioaikoja 20 MHz Larmorin taajuudella [26, s. 523].	25
4.1	Mittauskissa käytettyjen magneettien parametreja [1, s. 31].	39
4.2	Mallinnuksessa käytetyt johtavuudet.	56
5.1	Pyörrevirtamallinnuksessa käytetyt parametrit.	62
6.1	Käytetyt lämmittimen tehot sekä käämin 1 antureiden lämpötilat eri tehoilla ilman epokiskerrosta.	65
6.2	Käytetyt lämmittimen tehot sekä käämin 2 antureiden lämpötilat eri tehoilla ilman epokiskerrosta.	68
6.3	Käytetyt lämmittimen tehot sekä käämin 3 antureiden lämpötilat eri tehoilla ilman epokiskerrosta.	71
6.4	Pyörrevirtamallinnuksen antamat lämmitystehot taajuudella 63,8 MHz eri eristeen paksuuksilla.	75

7.1	Käämien jäähtymisajat, aikavakiot ja B-anturin lämpötilat jäähtymisen lopuksi epoksikerroksen kanssa ja ilman.	77
7.2	Käämien lämmönjohtavuudet sekä anisotrooppisuudet eri lämpötiloissa arvioituna kaavalla 4.6.	83
7.3	Käämien mallinnettujen ja kaavalla 4.7 laskettujen z-suuntaisten lämmönjohtavuuksien suhteet	83
7.4	Eristepaksuudet joilla lämmitysteho on taajuuksilla 20 MHz, 41,9 MHz ja 63,8 MHz pienentynyt noin puoleen suurimmasta arvostaan.	84
9.1	Käämien lämmönjohtavuudet eri lämpötiloissa.	92

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Bi-2212	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$
Bi-2223	$(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$
FID	Free Induction Decay, vapaan induktion vaimeneminen
FM	Frequency Modulation, taajuusmodulaatio
GAP	GdAlO_3
Gd	Gadolinium
GM	Gifford-McMahon
H_2	Vety
He	Helium
He-3	Helium-3
He-4	Helium-4
HTS	High Temperature Superconductors, korkean lämpötilan suprajoh-teet
INUMAC	Imaging of Neuro disease Using high-field MR And Contrastophores
IR	Inversion-Recovery
JB	Joyle-Brayton
LHC	Large Hadron Collider
LTS	Low Temperature Superconductors, matalan lämpötilan suprajoh-teet
MgB_2	Magnesiumdiboridi
MRI	Magnetic Resonance Imaging, magneettikuvaus
N_2	Typpi
NbTi	Niobititaani
Nb_3Sn	Niobitina
Ne	Neon
O_2	Happi
PT	Pulssiputki
RF	Radio Frequency, radiotaaajuus
RRR	Residual-Resistivity Ratio, resistiivisyyksien suhde
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
TUT	Tampere University of Technology
WIC	Wire-In-Channel
YBCO	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

A	Vektoripotentialiaali (Vs/m)
<i>A</i>	Pinta-ala (m ²)
<i>a</i>	Sisäsäde (m)
α	Terminen diffusiviteetti (m ² /s)
B	Magneettivuon tiheys (T)
<i>b</i>	Ulkosäde (m)
<i>C</i>	Lämpökapasiteetti (J/K)
c_p	Ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa (J/kgK)
D	Sähkövuon tiheys (C/m ²)
E	Sähkökentän voimakkuus (V/m)
ϵ	Emissiviteetti
ϵ_0	Tyhjiön permittiivisyys (F/m)
ϵ_r	Suhteellinen permittiivisyys
F_e	Emissiviteettikerroin
F_{1-2}	Näkyvyyskerroin
γ	Gyromagneettinen suhde
H	Magneettikentän voimakkuus (A/m)
<i>I</i>	Sähkövirta (A)
J	Sähkövirran tiheys (A/m ²)
j_{tot}	Käämin johtimen kokonaispituus (m)
$2l$	Korkeus (m)
L	Pyörimismäärä (Js)
L_{lorenz}	Lorenzin luku (W Ω /K ²)
<i>l</i>	Pituus (m)
λ	Lämmönjohtavuus (W/mK)
$\lambda_{ref,r}$	Säteen suuntainen lämmönjohtavuus (W/mK)
$\lambda_{ref,z}$	Pystyakselin suuntainen lämmönjohtavuus (W/mK)
M	Magnetisaatio (A/m)
<i>m</i>	Massa (kg)
μ	Permeabiliteetti (H/m)
μ_0	Tyhjiön permeabiliteetti (H/m)
μ_r	Suhteellinen permeabiliteetti
ν	Dipolimomentti (D)
<i>N</i>	Spinien määrä
N_{tot}	Käämin johtimen kierrosten lukumäärä
ω	Kulmanopeus (rad/s)
<i>P</i>	Teho (W)

\dot{Q}_r	Säteilylämpövirta (W)
Q	Lämpömäärä (J)
q	Lämpövirta (W)
R	Resistanssi (Ω)
ρ	Tiheys (kg/m^3)
ρ_v	Varaustiheys (C/m)
ρ_r	Resistiivisyys (Ωm)
σ	Stefan-Boltzmannin vakio ($\text{W/cm}^2\text{K}^4$)
σ_s	Sähkönjohtavuus (S/m)
S	Spin
T	Lämpötila (K)
t	Aika (s)
τ	Momentti (Nm)
τ_a	Aikavakio (s)
U	Jännite (V)
v	Nopeus (m/s)
W	Työ (J)

1. JOHDANTO

Suprajohtavuus, eli joidenkin aineiden kyky johtaa sähköä käytännössä häviöttä mahdollistaa sovelluskohteita jotka eivät olisi muuten mahdollisia. Suprajohteita käytetäänkin monenlaisissa sovelluksissa, kuten suprajohtemagneeteissa. Voimakkaita magneettikenttiä synnyttäviä magneetteja taas tarvitaan esimerkiksi magneettikuvauksessa (MRI, Magnetic Resonance Imaging) ja hiukkaskiihdyttimissä. Koska sähkö- ja kestoprojektoreilla ei saada aikaiseksi riittävän voimakkaita ja homogeenisiä magneettikenttiä, ovat suprajohteet käytännössä ainoa ratkaisu monissa sovelluksissa.

Tällä hetkellä kaikki tunnetut suprajohteet vaativat alhaisen lämpötilan toimiakseen, ja esimerkiksi käytetyin suprajohtemateriaali, niobititaani (NbTi), saavuttaa suprajohtavan tilan vasta alle 9,3 K:ssä [63]. Tästä johtuen suprajohteet vaativat tehokasta jäähdystä toimiakseen, ja yleisin käytetty menetelmä on astettaa esimerkiksi suprajohtava magneetti nestemäiseen heliumiin (kryoneste), jonka kiehumispiste on 4,2 K. Nestehelium on kuitenkin kallista ja jäähdystys vaatii magneettiin nähden suuren lämpöeristetyn säiliön, eli kryostaatin. Tämän takia jokin vaihtoehtoinen jäähdystysmenetelmä voisi olla taloudellisesti ja käytännöllisesti järkevä. Mekaaninen jäähdystys, eli niin kutsutut kryojäähdystimet, ovat yksi mahdollinen vaihtoehto kryonesteettömään jäähdystykseen. Kryojäähdystimet eivät tarvitse kryonesteitä toimiakseen, vaan vain sähköä kompressorille (ja mahdollisesti vettä kompressorin jäähdystykseen). Toisaalta alhaisissa lämpötiloissa kryojäähdystimien jäähdystysteho verrattuna kompressorin ottamaan tehoon on pieni, joten hyvin eristetty kryostaatti on edelleen tarpeen. Ilman kryonesteitä kryostaatista voidaan kuitenkin valmistaa pienempi.

Magneettikuvauslaitteiden päämagneetit ovat kaupallisesti merkittävien suprajohteiden käyttökohde. Magneettikuvauslaitteet sisältävät niin sanotun RF-käämin (Radio Frequency), joka synnyttää kuvauksen aikana korkeataajuisen RF-signaalin. Tämä signaali aiheuttaa muuttuvan magneettikentän, eli se voi saada aikaan pyörrevirta-

häviöitä suprajohtavan käämin resistiivisissä osissa.

Tässä työssä tarkastellaan niobititaanista valmistettujen magneettien jäähdyttämistä mekaanisesti ja magneettikuvauslaitteen RF-käämin magneetissa synnyttämien pyörrevirtojen vaikutusta. Mekaanisen jäähdytyksen tarkastelun yhteydessä tehdään kokeita Tomi Anttilan diplomityötä (NbTi suprajohtomagneettien stabiilisuus ja quench-analyysi) [1] varten valmistetuilla magneeteilla ja päätarkoituksena on selvittää kyseisten käämien lämmönjohtavuuksia. Lämmönjohtavuudella on suuri merkitys käämien toimintaan, koska se esimerkiksi määrää sen, kuinka suuri jäähdytysteho tarvitaan tietyn lämpötilan saavuttamiseen kun kohteesta poistettava lämpömäärä pysyy vakiona.

Kolme testimagneettia on kukin käämitty erityyppisestä Luvata Oy:n valmistamasta “wire-in-channel” (WIC) johtimesta, joita olisi luultavasti mahdollista käyttää esimerkiksi mekaanisesti jäähdytetyissä magneeteissa. Ensimmäisessä magneetissa on käytetty eristämätöntä kanavajohdinta, toisessa kanava on päällystetty ohuella lakkakerroksella ja kolmannessa kanavan ympärillä on käytetty sukkamaista PET-eristettä (polyeteenitereftalaatti).

Tämän työn toisessa luvussa esitellään ja vertaillaan eri vaihtoehtoja suprajohtavien magneettien jäähdytykseen. Luvussa 3 käydään läpi magneettikuvauksen toimintaa ja magneettikuvauslaitteiden tyypillistä rakennetta. Luvussa 4 on esitetty työn koe- ja mittausjärjestelyt sekä mallinnuksessa käytetyt magneettien lämpöverkkomallit. Seuraavassa luvussa on magneettikuvauslaitteen RF-käämin pulssien aiheuttamien pyörrevirtojen vaikutuksen arviointiin käytetyn mallinnuksen esittely. Tämän jälkeen luvussa 6 käydään läpi mittaustulokset ja niitä analysoidaan luvussa 7. Luvussa 8 on mittauksien ja mallien virhearvio.

2. SUPRAJOHTAVAN MAGNEETIN JÄÄHDYTYSVAIHTOEHDOT

Koska kaikki tunnetut suprajohteet vaativat huoneen lämpötilaa kylmemmän toimintalämpötilan suprajohtavan tilan saavuttamiseen, on jäähdytys tärkeässä osassa suprajohdesovelluksissa. Esimerkiksi niobititaanin kriittinen lämpötila T_c on noin 9,3 K [63]. Löydettyjen korkean lämpötilan suprajohteiden (HTS) kriittiset lämpötilat T_c voivat olla lähellä 100 K:iä mutta myös niiden toimintalämpötila on yleensä tätä alhaisempi, koska se mahdollistaa voimakkaammat magneettikentät ja stabiilimman toiminnan. Toisin sanoen myös HTS-materiaalit tarvitsevat tehokasta jäähdytystä. Jotta jäähdytys näin alhaisissa lämpötiloissa olisi kannattavaa, tulee eristyksen jäähdytettävän kohteen ympärillä olla hyvä, koska mahdollisimman pienellä lämpökuormalla voidaan minimoida vaadittu jäähdytysteho [22, s. 3]. Tämä riippuvuus tehokkaasta jäähdytyksestä onkin ollut yksi este suprajohteiden nykyistä laajemmalle käytölle esimerkiksi sähkön siirrossa, tuotossa ja kulutuksessa.

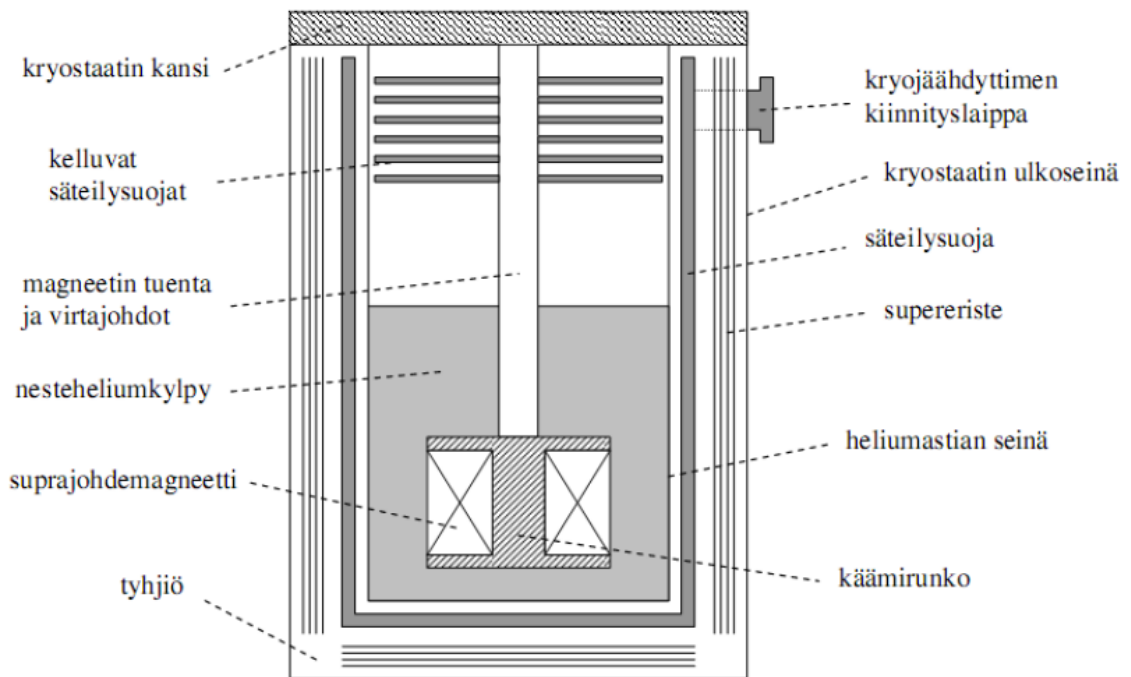
Kryonesteiden käyttö on ylivoimaisesti yleisin tapa jäähdyttää suprajohteita. Käytetyin kryoneste on helium (He), jonka kiehumispiste on noin 4,2 K [75]. Toinen vaihtoehto on kylmäksi jäähdytetyt kaasut, mutta tällöin ei pystytä hyödyntämään aineiden höyrystymislämpöä, joten jäähdytyksestä on huomattavasti vaikeampi tehdä isotermistä. Tämä johtuu siitä, että nestemäisessä jäähdytyksessä syntynyt lämpö absorboituu nesteeseen kiehumispisteen vakio­lämpötilassa, kun taas kaasujen tapauksessa syntynyt lämpö nostaa kaasun lämpötilaa [22, s. 28]. Kolmas keino on niin kutsutut kryojäädyttimet, joissa jäähdytys on toteutettu mekaanisesti. Tällöin ei välttämättä tarvitse käyttää kryonesteitä, jotka ovat usein kalliita ja vaativat myös ylimääräistä tilaa.

Eri jäähdytysvaihtoehdot voidaan jakaa kahteen laajaan sovellusalueeseen: suljettuihin ja avoimiin järjestelmiin. Avoin järjestelmä voi olla yksinkertaisesti astia, jossa jäähdytettävä järjestelmä on upotettuna jäähdytys­nesteteeseen. Suljetuissa systeemeissä jäähdytysaine pysyy järjestelmän sisällä. [22, s. 3]

2.1 Kryostaatin rakenne ja lämpökuorma

Yleisimmin suprajohdesovelluksissa jäähdytettävä kohde asetetaan lämpöeristettyyn säiliöön, jonka sisällä jäähdytys tapahtuu. Tätä säiliötä kutsutaan yleisesti kryostaatiksi ja se koostuu usein kahdesta sisäkkäisestä astiasta, joiden välillä on jokin eriste. Eriste voi olla esimerkiksi tyhjiö, jossa on säteilysuojia tai jokin kiinteä eristeaine. Suprajohdesovelluksissa käytetään kuitenkin tällä hetkellä aina tyhjiöeristystä alhaisien toimintalämpötilojen takia. Tässä työssä tarkastelu tehdään pääsääntöisesti suprajohdemagneetin (erityisesti magneettikuvauslaitteen päämagneetin) jäähdytyksessä käytetyn kryostaatin näkökulmasta.

Kuvassa 2.1 on tyypillisen suprajohdemagneetin jäähdytykseen tarkoitetun kryostaatin poikkileikkaus [48]. Kuvassa nähdään joitakin yleisesti käytettyjä rakenneseosia, kuten sisäkkäiset astiat, säteilysuoja ja tyhjiössä olevat monikerroseristeet eli niin sanotut supereristeet.



Kuva 2.1 Tyypillisen nestejäähdytteisen kryostaatin poikkileikkaus [48].

Kryostaatin käytössä kokema lämpökuorma voidaan pääsääntöisesti jakaa kolmeen osaan: säteilyyn, johtumiseen ja lämmöntuotantoon. Johtumisesta syntyvät häviöt

riippuvat materiaalin lämmönjohtavuudesta λ sekä materiaalin yli olevasta kokonaislämpöerosta. Käytettäessä tyhjiöeristystä magneetin virtajohtimet sekä kryostaatin tukirakenteet aiheuttavat yleensä suurimmat johtumishäviöt. Virtajohtimet generoivat myös joulelämpöä, jos niitä ei ole valmistettu esimerkiksi korkean lämpötilan suprajohteesta. Korkean lämpötilan suprajohteista valmistetuilla virtajohtimilla voidaan alentaa johtumisesta ja lämmöntuotannosta syntyvää lämpökuormaa esimerkiksi 4,2 K:ssä toimivan kryostaatin sisempään osaan. Myös erilaiset suprajohtavan magneetin häviöt (esimerkiksi muuttuvasta magneettikentästä johtuvat) voivat aiheuttaa kryostaattiin toimintalämpötilasta lähes riippumatonta lämpökuormaa. [22, s. 34]

Myös lämmönsiirron kolmen mekanismin: johtumisen, konvektion ja säteilyn vaikutus kryostaatin kokonaislämpökuormaan riippuu toimintalämpötilasta. Käytettäessä esimerkiksi tyhjiötä konvektion vaikutus eliminoituu, kun taas kiinteillä eristeillä myös säteilyn vaikutus on hyvin pieni. Tästä johtuen eri eristeratkaisut sopivat paremmin eri lämpötiloihin. Suprajohdesovelluksissa käytetään tällä hetkellä aina tyhjiöeristystä, joten tässä työssä tarkastellaan pääsääntöisesti vain säteilyn aiheuttamaa lämpökuormaa.

Säteilyn siirtämää lämpöä voidaan approksimoida muokatulla Stefan-Boltzmannin yhtälöllä [45, s. 47]

$$\frac{\dot{Q}_r}{A_1} = \sigma F_e F_{1-2} (T_2^4 - T_1^4), \quad (2.1)$$

missä yhtälön vasen puoli on lämpövirta \dot{Q}_r (W) suhteutettuna kryostaatin sisemmän pinnan pinta-alaan A_1 , jolloin yksiköksi tulee W/m^2 ja se edustaa säteilylämpövirran tiheyttä. Oikealla puolella σ on Stefan-Boltzmannin vakio ($5,67 * 10^{-12} \text{ W}/\text{cm}^2\text{K}^4$), F_e emissiviteettikerroin ja F_{1-2} näkyvyyskerroin heijastavien pintojen välillä. Alaindeksi 1 viittaa sisempään, eli kryostaatin tapauksessa kylmempään pintaan ja 2 ulompaan, eli lämpimämpään pintaan. Näkyvyyskerroimen arvo on 1 jos kylmempi pinta on kokonaisuudessaan ulomman pinnan ympäröimä, mikä on tavanomaista kryostaateissa. Kun tarkasteltavat pinnat ovat sisäkkäiset sylinterit tai pallot, voidaan emissiviteettikerroin kirjoittaa muodossa [45, s. 47]

$$F_e = \left[\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (2.2)$$

missä ϵ on pintojen emissiviteetti. Emissiviteetti saadaan lämpösäteilijän lähettämän säteilyvirran pintatiheyden suhteesta absoluuttisen mustan kappaleen vastaa-

vaan arvoon samassa lämpötilassa, eli hyvin säteilyä heijastavien aineiden emissiviteetit ovat pieniä. [45, s. 47]

Kuten yhtälöstä 2.1 nähdään, riippuu säteilyn teho vahvasti kahden pinnan lämpötilaerosta ja alhaisissa lämpötiloissa sen merkitys on pienempi kuin johtumalla siirtyvän lämmön. Tästä johtuen alle 100 K lämpötiloissa toimittaessa käytetään eristyksenä pääsääntöisesti tyhjiötä, johon asetetaan yleensä yksi tai useampi jäähdytetty säteilysuoja sekä supereristettä. Supereriste koostuu tyhjiöön astettavista eristekalvoista, joilla on hyvä emissiviteetti ja jotka on erotettu toisistaan pienen lämmönjohtavuuden omaavalla lasikuitupohjaisella harsomateriaalilla. Kerroksia on tyypillisesti 2–4 kerrosta millimetrillä ja yhden eristekalvon paksuus on noin 5–75 μm . Säteilysuojien ja supereristeen tarkoituksena on minimoida tyhjiötilaan tuleva säteilylämpövuoto heijastamalla sitä takaisin ulkokuoreen. Heijastavien pintojen välissä olevien kerrosten on tarkoitus pienentää supereristeen läpi johtumalla siirtyvää lämpöä. [45, s. 55]

Jos kryostaatti toimii esimerkiksi 4,2 kelvinin lämpötilassa (kuten useimmat kryostaatit) ja säteilysuoja jäähdytetään lähelle tai alle 100 kelviniä (esimerkiksi 77 K), koostuu kryostaatin säteilylämpökuorma kahdesta komponentista; säteilystä lämpötilavälillä 300 K ja 77 K ($Q_{\text{rad}}(300 \rightarrow 77)$), sekä lämpötilavälillä 77 K ja 4 K ($Q_{\text{rad}}(77 \rightarrow 4)$). Yksinkertaisella laskuesimerkillä

$$\frac{Q_{\text{rad}}(300 \rightarrow 77)}{Q_{\text{rad}}(77 \rightarrow 4)} = \frac{300^4 - 77^4}{77^4 - 4^4} \approx 230$$

voidaan havainnollistaa että säteilyn aiheuttama lämpökuorma on huomattavasti suurempi ylemmällä lämpötilavälillä. Johtumisesta syntyvän häviön ero samoilla lämpötilaväleillä on noin 6, kuten approksimoitu laskuesimerkki osoittaa

$$\frac{Q_{\text{cond}}(300 \rightarrow 77)}{Q_{\text{cond}}(77 \rightarrow 4)} = \frac{\int_{77}^{300} \lambda(T) dT}{\int_4^{77} \lambda(T) dT} \approx 6,$$

missä $\lambda(T)$ materiaalin lämmönjohtavuus lämpötilassa T . Kuten nähdään, esimerkin tulos riippuu materiaalista ja kyseisessä tapauksessa laskenta on tehty raudalle. [22, s. 34]

Yllä olevista esimerkeistä voidaan päätellä, että suurin lämpökuorma syntyy ylemmällä lämpötilavälillä. Lähteessä [22, s. 35] olevan analyysin mukaan tyypillisessä MRI-laitteessa lämpökuorma on noin 70 kertaa suurempi ja jäähdytysteho noin 2,6

kertaa suurempi korkeammassa lämpötilassa. Tämän takia korkeampi toimintalämpötila ei välttämättä tuota niin suuria säästöjä kuin voisi kuvitella [22, s. 35].

2.2 Nestejäähdytys

Aina 1980-luvulle asti suprajohdemagneetit jäähdytettiin poikkeuksetta nestemäisellä heliumilla, kunnes vuonna 1987 löydettiin ensimmäiset HTS-materiaalit [22, s. 3] ja kryojäähdyttimet kehittyivät [30, s. 219]. Tämä mahdollisti 1990-luvun alkupuolella niin kutsuttujen “kuivien” magneettien valmistuksen, joissa ei tarvittu kryonesteitä. Nestemäinen jäähdytys on kuitenkin vielä nykyäänkin käytetyin suprajohteiden jäähdytysmenetelmä.

Joidenkin tunnettujen aineiden kiehumispiste on alle 100 K, kuten heliumin, vedyn, neonin, argonin, hapen ja typen. Näistä helium on käytetyin kryoneste, mutta myös muille on olemassa sovelluskohteita. Taulukkoon 2.1 on koottu joidenkin nesteiden ominaisuuksia [22, s. 27].

Taulukko 2.1 Kryonesteiden ominaisuuksia [22, s. 27].

Neste	Kiehumispiste (K)	Höyrytymislämpö (kJ/kg)	Tiheys (kg/cm ³)	1 W lämpökuorman aiheuttama kiehumia (l/h)
He	4,2	20,9	125	1,380
H ₂	20,4	443	71	0,115
Ne	27,1	86	1206	0,035
N ₂	77,4	199	807	0,022

Kuvassa 2.1 nähtiin tavanomaisen nesteheliumiin perustuvan kryostaatin rakenne. Kuvan mukaisessa ratkaisussa paikallaan oleva kryoneste ja siihen upotettu magneetti sijaitsee kryostaatin sisemmässä astiassa, eli magneetti on niin sanotussa nestekylvyssä.

Lämpötilavälillä 20–80 K on käytettävissä kolme kryonestettä: vety, neon ja typpi. Nesteiden kiehumispistettä voidaan muuttaa paineen avulla jolloin kyseiset nesteet voisivat toimia jäähdyttiminä lämpötilaväleillä 13,9–80 K (H₂ 13,9–33,2, Ne 24,5–44,4 ja N₂ 63,2–80 K). Toisaalta kryostaatin toiminta muussa kuin ilmakehän paineessa voi lisätä sen hintaa ja monimutkaisuutta sekä huonontaa luotettavuutta, joten paineen muutos ei välttämättä ole paras ratkaisu saavuttaa haluttua lämpötilaa. [22, s. 27]

Edellä mainituilla nesteillä on huomattavasti suurempi höyrystymislämpö kuin nestemäisellä heliumilla, minkä johdosta samansuuruinen lämpökuorma aiheuttaa pienemmät häviöt, kuten taulukosta 2.1 nähdään. Höyrystymislämpö onkin hyvin tärkeä ominaisuus jäähdytyksen kustannuksia ajatellen. [22, s. 27]

Eri jäähdytysnesteiden yhteydessä ei ole kustannusten kannalta järkevää keskittyä pelkästään niiden jäähdytysominaisuuksiin, vaan esimerkiksi eri aineiden turvallisuus voi vaikuttaa investointi- ja käyttökustannuksiin. Vaikka vety näyttäisi muiden ominaisuuksiensa ansiosta soveltuvan hyvin jäähdytykseen, on se kuitenkin helposti räjähtävää usealla seossuhteella ilman kanssa. Tämän takia vetyä käytettäessä tulee varmistaa ettei räjähdystä pääse tapahtumaan, mikä voi tehdä kryostaatista monimutkaisemman ja näin nostaa sen hintaa, ja mahdollisesti poistaa saavutetun hyödyn.

Kaikki jäähdytysnesteet voivat myös aiheuttaa kryostaatissa merkittävän paineen kasvun, jos suuri määrä nestettä kiehuu lyhyessä ajassa jonkin äkillisen lämmön generoitumisen seurauksena. Äkillinen lämmön nousu voi johtua esimerkiksi suprajohtavan magneetin (tai sen osan) siirtymisestä normaalitilaan, eli niin sanotusta *quenchista*, jolloin käämissä kulkeva sähkövirta alkaa synnyttää lämpöhäviöitä. Tämän takia kryostaatissa tulee olla jokin mekanismi paineen alentamiseen, kuten venttiili, jonka kautta ylimääräinen kaasu pääsee poistumaan. [22, s. 27]

Kryonesteitä voidaan hankkia valmistamalla niitä esimerkiksi tarkoitukseen valmistetulla nesteyttimellä tai ostamalla markkinoilta säilytysastioissa. Kryonesteitä olisi tarvittaessa mahdollista nesteyttää myös kryojäähdyttimillä. [22, s. 26]

2.3 Mekaaninen jäähdytys

Mekaaniset jäähdyttimet perustuvat samaan periaatteeseen kuin tavanomaiset jääkaapit tai pakastimet; niissä puristetaan ja laajennetaan kaasua, joka taas sitoo lämpöä halutusta kohteesta. Mekaanisia jäähdyttimiä, joilla saavutetaan alle 120 K lämpötiloja kutsutaan yleisesti kryojäähdyttimiksi. Ne ovat pääosin suljettuja systeemejä, eli jäähdytykseen käytetty kaasu pysyy jatkuvasti laitteen sisällä kiertäen tietyn syklin ja palaten taas alkutilaansa. Näin saavutetaan parempi hyötysuhde kuin avoimessa jäähdytyksessä. Jäähdytys tapahtuu johtamalla niin kutsutun kylmäpään avulla, joka on termisessä yhteydessä jäähdytettävään kohteeseen. Kylmäpää on yleensä sylinterin muotoinen ja niitä voi olla enemmän kuin yksi, eri lämpö-

tiloissa (kutsutaan vaiheiksi) [22, s. 13]. Erilaisiin kiertomekanismeihin perustuvia kryojäädyttimiä ovat esimerkiksi Gifford-McMahon (GM), Stirling, Joule-Brayton (JB), Joule-Thomson (JT), Claude ja pulssiputki (PT).

Kryojäädyttimien yhteydessä tärkeitä aisoita ovat luotettavuus, hyötysuhde, koko ja paino, värinä ja ääni, lämpötilan heilahtelu, sähkömagneettinen häiriö, lämmön poisto sekä hinta. Nykyisissä laitteissa luotettavuus on jo kohtuullisen hyvä ja huoltoväli voi olla 10000–20000 tuntia [15, 67].

2.3.1 Kryojäädytin

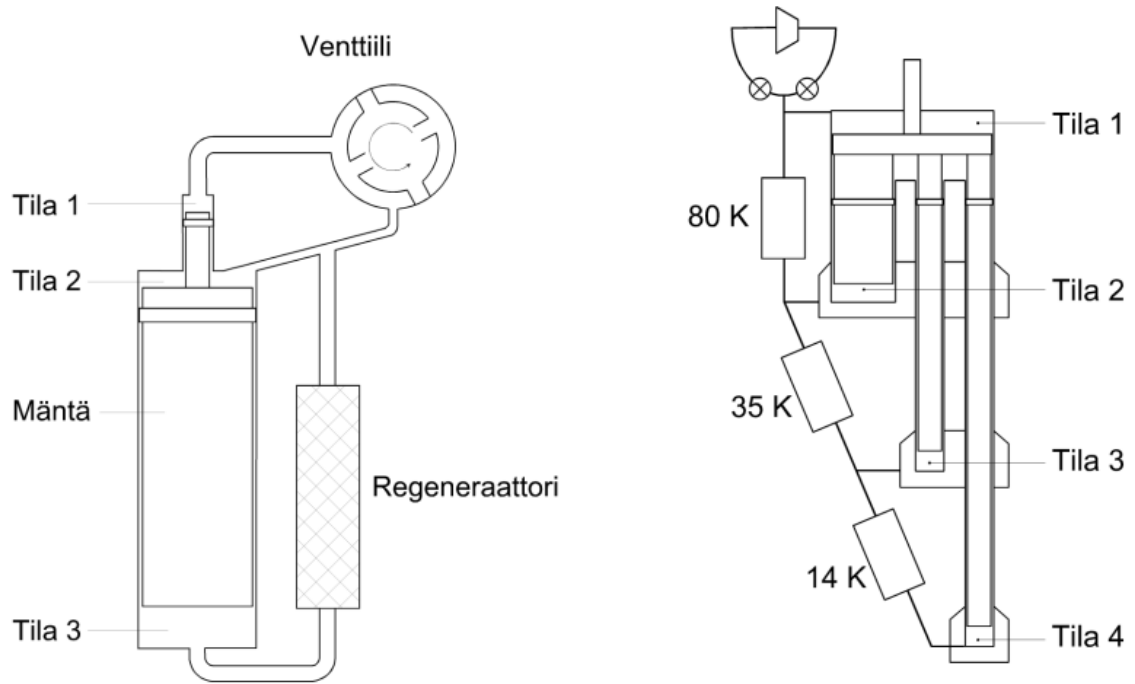
Kaikille kryojäädyttimille on yhteistä kaasun laajeneminen ja kulku lämmönvaihtimen läpi. Lämmönvaihtimia on kahdenlaisia, rekuperatiivisia ja regeneratiivisia. Rekuperatiivisessa lämmönvaihtimessa kylmäpäähän menevä ja sieltä tuleva kaasu kulkevat omaa kanavaansa pitkin, jolloin lämpö kulkee väliseinän matriisimetallin kautta kanavien välillä. Esimerkiksi JT-, JB- ja Claude-kiertoon perustuvat kryojäädyttimet käyttävät rekuperatiivisia lämmönvaihtimia. Regeneratiivisessa lämmönvaihtimessa tuleva ja lähtevä kaasu kulkevat saman kanavan kautta, jolloin kanava on täytetty huokoisella matriisimetallilla. Regeneratiivisia lämmönvaihtimia käyttäviä kiertoprosesseja ovat esimerkiksi Stirling, PT ja GM. [44]

Jäädyttimien rakenne ja toiminta

Yleisimmin laitevalmistajien tarjoamat kryojäädytintyytit ovat GM, Stirling ja pulssiputki. Kuvassa 2.2 on nähtävissä Gifford-McMahon jäädyttimen periaatteellinen rakenne.

GM- ja Stirling-kierrot alkavat työllä, jolla puristetaan huoneen lämpöinen jäädytyskaasu suurempaan paineeseen. Tämän jälkeen kaasu kulkee lämmönvaihtimen kautta, jossa puristuksen aiheuttamaa lämpöä siirtyy regeneratiiviseen lämmönvaihtimeen ja kaasun lämpötila ja paine laskee. Seuraavaksi kaasu laajenee ja jäähtyy, jolloin se voi siirtää lämpöä jäädytettävästä kohteesta itseensä. Lopuksi kaasu kulkee uudestaan lämmönvaihtimen kautta, jolloin se taas lämpenee lähelle huoneen lämpötilaa ja uusi jäädytyskiertos voi alkaa. [45, s. 43–44]

Kuvassa 2.2 nähdään myös mahdollisuus useampaan kylmäpäähän, jotka toimivat



Kuva 2.2 GM-kryojäähdyttimen periaatteellinen rakenne [44].

eri lämpötiloissa. Tällöin mäntiä ja lämmönsiirtimiä on useampia ja kylmin lämpötila saavutetaan “alimmassa” kylmäpäässä. Ylempiä kylmäpäitä voidaan käyttää esimerkiksi kryostaatin säteilysuojien jäähdyttämiseen, jolloin alempaan lämpötilaan tuleva lämpökuorma pienenee.

Kiertoprosessien vertailu

JT-kiertoon perustuvien jäähdyttimien etuna voidaan pitää sitä, ettei niissä ole kylmiä liikkuvia osia (jotka voivat olla hauraita). Näiden jäähdyttimien toiminta ei myöskään aiheuta laitteen värähtelyä, mikä voi vähentää systeemin mekaanisia rasituksia. Kylmäpäästä pystytään myös tekemään hyvin pieni, jolloin se ei vie paljon tilaa. Huonona puolena JT-jäähdyttimet vaativat korkean paineen, jolloin kompressori joutuu suuremmalle rasitukselle ja kuluu nopeammin. JT-kierron hyötysuhde ei myöskään ole kovin hyvä alle 90 K lämpötiloissa. [44]

Stirling-kierrolla on yleisesti parempi hyötysuhde kuin GM-kierrolla, mutta siihen perustuva jäähdytin on usein myös kalliimpi valmistaa, varsinkin jos laitteelle halutaan pitkä käyttöikä. GM-jäähdyttimiä pidetään myös luotettavana pitkän kehi-

tystyön ja yksinkertaisemman rakenteen vuoksi. Stirling-laitteet pystytään valmistamaan pieniksi ja kevyiksi ja niitä on valmistettu markkinoille yli 140 000. GM-jäähdyttimet ovat taas usein suuria ja raskaita, mutta niitä valmistetaan noin 20 000 vuosittain. Toisaalta molemmissa prosesseissa käytetty mäntä aiheuttaa väistämättä laitteen värinää. [44]

Pulssiputki-jäähdyttimet ovat suhteellisen uusia verrattuna muihin kryojäähdyttiiniin; nykyisenlainen moderni PT-jäähdytin keksittiin vuonna 1984. Pulssiputki-jäähdyttimillä on paras hyötysuhde kaikista kryojäähdyttimistä 40–200 K lämpötiloissa. Niissä ei myöskään ole liikkuvia kylmiä osia, minkä ansiosta voidaan saavuttaa parempi luotettavuus sekä pienempi värinä ja sähkömagneettinen häiriö (EMI, ElectroMagnetic Interference). Huonona puolena pulssiputkista ei voida valmistaa kovin pieniä, jos niiden halutaan olevan tehokkaita. Toisena huonona puolena painovoima aiheuttaa laitteissa epävakautta, eli niiden käyttö on suuntariippuvaista. Toisin sanoen pulssiputket toimivat oikein vain kun ne ovat pystyasennossa, kun taas esimerkiksi GM-jäähdyttimet voivat toimia muissakin asennoissa, ilman kovin suurta vaikutusta jäähdytystehoon. Gifford-McMahon-jäähdyttimet ovat myös pääsääntöisesti saman jäähdytystehon tarjoavia PT-jäähdyttimiä halvempia. [33, 44, 67]

Kryojäähdyttimiä olisi mahdollista käyttää myös nesteyttämään kryonesteitä asettamalla se kaasua sisältävään astiaan. Jos kylmäpään lämpötila on alle aineen kiehumispisteen ja yli sen jäätymispisteen kaasu kondensoituu ja kerääntyy astian pohjalle. [22, s. 13–14]

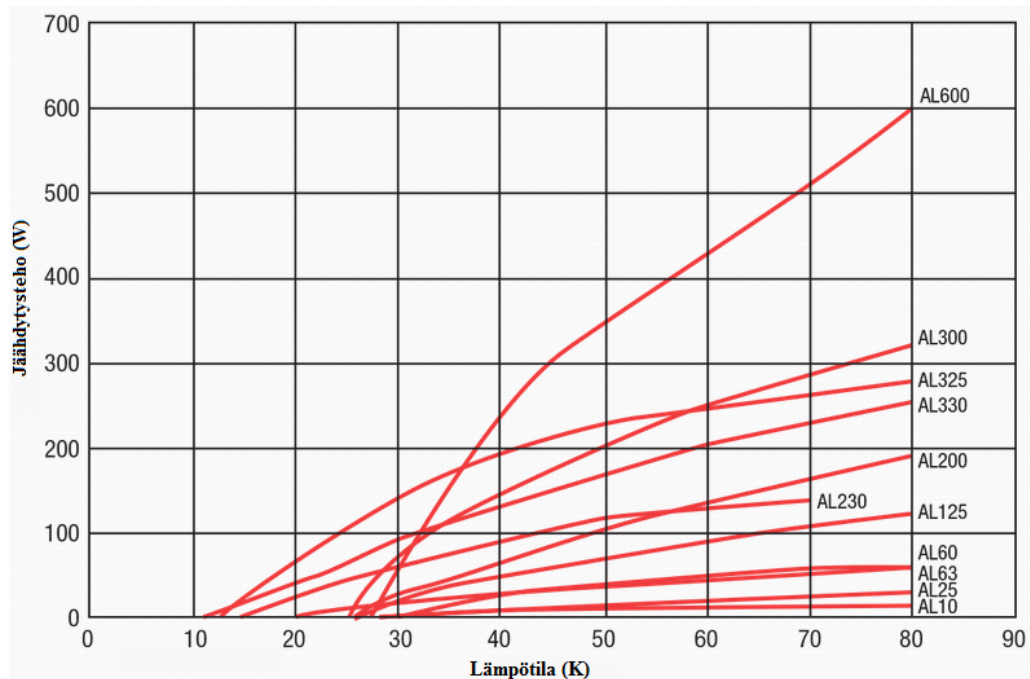
2.3.2 Nykyiset kryojäähdyttimet

Nykyään on saatavilla kryojäähdyttimiä useille eri lämpötiloille aina alle 4 kelviniä yli 77 kelviniin. Ennen ääni ja värinä saattoivat olla ongelmia kryojäähdyttimien yhteydessä, mutta nykyään pystytään valmistamaan jo kohtuullisen hiljaisia ja stabiileita laitteita. Myös jäähdytyslaitteiden ja kompressoreiden koot ovat pienentyneet. Kryojäähdytin vaatii tehokasta kompressoria kaasun puristukseen, ja se on yleensä jäähdyttimestä erillinen yksikkö. Kompressori vaatii myös jäähdytystä, mikä on yleensä toteutettu vedellä tai ilmalla.

Kryojäähdyttimiä valmistavat esimerkiksi Cryomech [15], Sunpower Inc. [71], Janis Research [32] ja Sumimoto Heavy Industries [67]. Yritykset tarjoavat laajan valikoiman GM-, JT-, pulssiputki- ja Stirling-tekniikkoihin perustuvia kryojäähdyttimiä

lämpötiloille 4–80 K.

Kuvassa 2.3 on nähtävissä Cryomechin valmistamien GM-kryojäähdyttimien jäähdytysteho lämpötilan funktiona [15]. Cryomech tarjoaa GM-jäähdyttimilleen kolmen vuoden tai 8000 tunnin vakuutuksen, riippuen kumpi toteutuu ensin. Keskimääräiseksi huoltoväliksi ilmoitetaan 10000 tuntia, ja laitteet on tarkoitettu lämpötiloihin 25–125 K.



Kuva 2.3 Cryomechin valmistamien GM-kryojäähdyttimien jäähdytysteho lämpötilan funktiona [15].

Taulukossa 2.2 on esitelty kaksi Cryomechin valmistamaa jäähdytintä, joista toinen perustuu pulssiputki-tekniikkaan (PT415) [13] ja toinen GM-tekniikkaan (AL600) [12], sekä SHI Cryonetics Groupin RDK-415D 4 K:in GM-jäähdytin [68]. PT415 ja RDK-415D ovat kaksivaiheisia, ja alemmaa, eli kylmempää kylmäpäättä nimitetään 2. vaiheeksi ja ylempää 1. vaiheeksi. Lähteessä [66] RDK-415D-jäähdyttimen kompressorille ei ilmoitettu melutasoa.

Taulukossa 2.3 on taulukossa 2.2 esitettyjen jäähdyttimien kompressorien tehot. RDK-415D on yhteensopiva useamman kompressorin kanssa, jotka ovat joko vesitai ilmajäähdytteisiä. Taulukkoon on kuitenkin otettu mukaan ilmajäähdytteinen kompressorivertailun vuoksi.

Taulukko 2.2 Kryojäähdyttimien parametreja. PT415 ja RDK-415D sisältää kaksi kylmäpäättä, ja melu on ilmoitettu kompressorille [11, 12, 13, 68, 69].

Malli	Jäähdytysteho 50 Hz (W)	Paino (kg) jäähd./kompr.	Kompr. jäähdytys	Suurin melu (dBA@1m)
PT415	0 @ 2,8 K (2.)			
	1,5 @ 4,2 K (2.)			
AL600	0 @ 32,2 K (1.)			
	40 @ 45 K (1.)	25/190,5	Vesi 11,5 l/min	76
	0 @ 25 K			
RDK-415D	340 @ 50 K			
	580 @ 80 K	41,8/213	Vesi 11,4 l/min	76
	0 @ 2,5 K (2.)			
	1,5 @ 4,2 K (2.)			
RDK-415D	0 @ 29 K (1.)			
	35 @ 50 K (1.)	18,5/140	Ilma 28 m ³ /min	-

Taulukko 2.3 Kryojäähdyttimien kompressorien tehot [12, 13, 66].

Kompressorin teho 50 Hz	PT415: 9,2 kW	AL600: 11,5 kW	RDK-415D: 6,5–7,2 kW

PT415- ja AL600-jäähdyttimet vaativat tehokkaimmat Cryomechin tarjoamat kompressorit. Kuten nähdään, PT415-mallin jäähdytysteho 4,2 kelvinissä on vain 1,5 W:a kun samalla kompressori vaatii 10,7 kW:n tehon. Kompressorin jäähdytys tapahtuu vedellä molemmissa jäähdyttimissä, virtaaman ollessa noin 11,5 litraa minuutissa. AL600-malli tarjoaa kohtuullisen suuria jäähdytystehoja 50 K:istä ylöspäin. Tyyppillisesti jäähtymisajaksi kryojäähdyttimen referenssilämpötilaan ilman kuormaa ilmoitetaan noin 15–60 minuuttia. [12, 13, 68]

Käyttämällä helium-4 (He-4) isotoopia, pulssiputki-kryojäähdyttimillä voidaan saavuttaa noin 1,9 K lämpötiloja. Käyttämällä helium-3 (He-3) isotoopia voidaan saavuttaa noin 1 K:in lämpötila, mutta nykyisellään He-3 on kallista ja vaikeasti saatavaa, joten sen käyttö on järkevää vain erikoistapauksissa. Lähteessä [34] testattu kaksivaiheinen pulssiputki saavutti 1,27 K lämpötilan ilman kuormaa käytettäessä He-3:a. Kompressorin tehon ollessa 1,3 kW tuotti vaihe 2. 42 mW jäähdytystehon 2 K lämpötilassa ja vaihe 1. 520 mW lämpötilassa 4,2 K. [16, 34]

2.4 Jäähdytyksen hyötysuhde ja kustannukset

Jäähdytys vaatii aina tietyn määrän työtä. Ideaalisessa tapauksessa vaaditaan vähintään käänteisen Carnot'n kierron verran jäähdytystehoa. Tällöin tehdyn työn W ja poistetun lämmön Q suhde on yhtälön

$$\frac{W}{Q} = \frac{T_0}{T_c} - 1 \quad (2.3)$$

mukainen, missä T_0 on ympäristön lämpötila ja T_c matala lämpötila. Suhdetta $\frac{W}{Q}$ kutsutaan jäähdytyksen laatuluvuksi ja sen käänteisarvoa hyötykertoimeksi [45]. Taulukossa 2.4 on esitetty laatuluku lämpötilan 300 K ja T_c välillä.

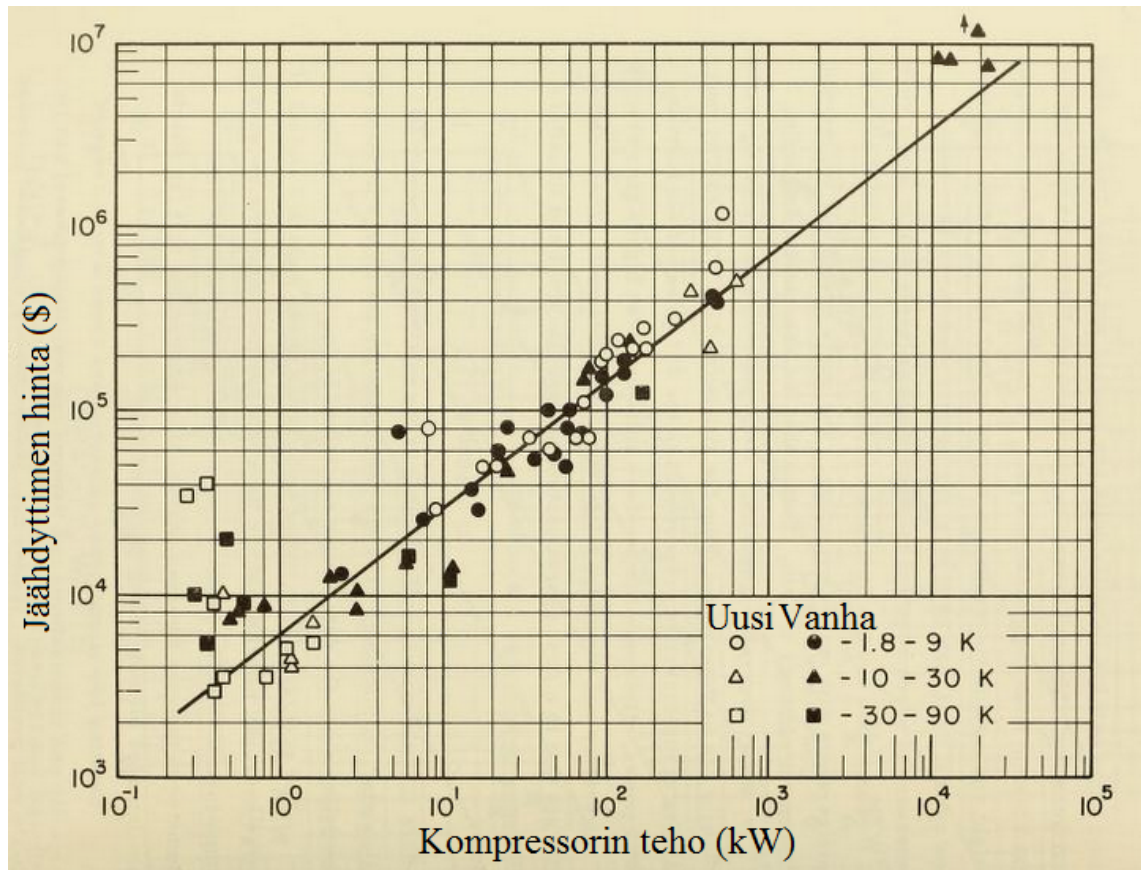
Taulukko 2.4 Jäähdytyksen laatuluku ideaalitapauksessa lämpötilan 300 K ja T_c välillä [45].

T_c (K)	120	77	20	4.2	1
$\frac{W}{Q}$	1,5	2,9	14	70	299

Kuten nähdään, ideaalitapauksessakin vaaditun jäähdytystehon ero 120 K:in ja 1 K:in välillä on noin 200-kertainen. Todellisuudessa jäähdytyksessä tapahtuu myös paljon muita häviöitä, jolloin hyötysuhde jää huomattavasti ideaalista Carnot'n kiertoa pienemmäksi. Toisaalta kryojäähdyttimien yhteydessä tehokkaampi jäähdytin saavuttaa paremman hyötysuhteen, ja koska jäähdytin vaatii kompressorin, voidaan kustannusten nousua arvioida eri tehoisten kompressorien tehon ja jäähdytyksen kustannuksien suhteella. Lähteen [70] mukaan jäähdytyksen hinnat kasvavat noin kulmakertoimella 0,7 lisättäessä kompressorien tehoa, mitä on hahmotettu kuvassa 2.4. Kuvassa on tutkimuksen aikaan (1974) uusia ja vanhoja kryojäähdyttimiä, joiden hinnat kasvoivat kyseisellä kulmakertoimella kompressorin tehon funktiona.

Kuten kuvasta 2.3 huomataan, pienenee kryojäähdyttimien jäähdytyksen teho alemmissä lämpötiloissa. Vaadittu kompressoriteho kuitenkin pysyy samana, jolloin ideaaliseen Carnot'n kiertoon verrattuna riippuu hyötysuhde jäähdytyksen tehosta. Toisaalta tutkimus [70] osoitti, ettei jäähdytyksen tehon ja lämpötilan välillä ollut havaittavaa vastaavuutta tarkasteltaessa Carnot'n hyötysuhdetta.

Eri kiertojen hyötysuhteet eivät ole samansuuruisia ja kuten sanottua ne riippuvat myös kompressorin tehosta. Esimerkiksi Stirling-kierron hyötysuhde on 5–10



Kuva 2.4 Jäähdytyksen kustannukset kompressorin tehon funktiona [70].

% jo alle 100 W kompressorin teholla ja se nousee lähelle 25 %:a 10 kW tehoilla. GM-kierto vaatii tehokkaan kompressorin ollakseen kannattava (yleensä yli 1 kW), mutta se saavuttaa huomattavasti alhaisempia hyötysuhteita, vain noin 10 % kompressorin tehon lähestyessä 10 kW:a. Pulssiputki-jäähdyttimien hyötysuhde on lähellä Stirling- tai GM-jäähdyttimiä (yli 40 K lämpötiloissa yleensä parempi), riippuen tyypistä. [59]

Jos verrataan “kuivaa” ja “märkää” kryostaattia, kyojäähdyttimiä käytettäessä kryostaatin käyttökustannukset tulevat pääosin kompressorin käyttämästä sähköstä ja sen jäähdytykseen mahdollisesti käytetystä vedestä. Nestemäisen jäähdytyksen yhteydessä jäähdytysnesteen kiehuminen aiheuttaa tarpeen uudelleen täyttöön, joten käyttökustannukset koostuvat pääosin tästä ja mahdollisesti säteilysuojan jäähdytykseen käytetyn kyojäähdyttimen toiminnasta.

Suprajohdemagneettisovelluksissa, käytettäessä kyojäähdytintä lähtöinvestoinnit

koostuisivat pääosin jäähdyttimen ja sen kompressorin hinnasta sekä kryostaatista. Kun jäähdytysnestettä ei tarvita, voisi se yksinkertaistaa ja pienentää kryostaattia ja näin alentaa sen hintaa. Nestejäähdytyksessä tarvitaan kryostaatin lisäksi jäähdytysneste, ja tämän lisäksi magneetti tulee jäähdyttää toimintalämpötilaansa. Nestejäähdytyksessä esimerkiksi tyypillinen magneettikuvauslaitteen kryostaatti voi sisältää 1800 litraa kryonestettä, jolloin ensimmäinen täyttö muodostaa merkittävän kustannuksen. Myös magneetin esijäähdytys on perinteisesti tehty nesteen avulla, mihin voidaan käyttää esimerkiksi tyyppiä. Tyypillinen heliumin lisäsväli (esimerkiksi 500 litraa) nykyisissä MRI-laitteissa on noin 2–3 vuotta. [62, s. 29]

Taulukossa 2.5 on joitakin arvioita kryonesteiden hinnoista ja suhteutettu kustannus heliumiin ζ , jossa otetaan huomioon taulukon 2.1 mukaiset erot höyrystymislämmössä [45, s. 42]. Eri nesteiden hinnat vaihtelevat riippuen maantieteellisestä paikasta ja ajankohdasta, joten taulukossa olevat arvot ovat vain suuruusluokka-arvioita.

Taulukko 2.5 Kryonesteiden hintoja [45, s. 42].

Neste	Hinta (€/l)	Suhteellinen hinta ζ
He	13	1
H ₂	0,4	$2,4 * 10^{-3}$
Ne	100	0,19
N ₂	0,3	$3,6 * 10^{-4}$
O ₂	0,25	$2,1 * 10^{-4}$

Kuten taulukosta 2.5 nähdään, helium on suhteellisesti kallein jäähdytysneste, mutta valitettavasti myös ainoa, jolla magneetteja voidaan jäähdyttää 4,2 kelviniin. Käytettäessä HTS-materiaaleja joiden kriittinen lämpötila on yli 77 K, on typpi edullinen vaihtoehto jäähdytysnesteeksi, edellyttäen että tässä lämpötilassa saavutetaan riittävät toiminta-arvot. Tosin myös suurin osa HTS-sovelluksista vaatii tätä alemman toimintalämpötilan riittävän suurien sähkövirtojen saavuttamiseksi.

Magnesiumdiboridi (MgB₂) on suprajohde, jonka kriittinen lämpötila on noin 39 K. Sen jäähdytykseen vety voisi sopia hyvin, tosin silloin täytyisi huolehtia räjähdysvaarasta. Toinen vaihtoehto olisi neonin käyttö, joka on harvinaisuutensa takia litrahinnaltaan kallista, mutta hyvän höyrystymislämpönsä ansiosta kuitenkin taulukon 2.5 mukaisilla hinnoilla heliumia edullisempaa, jos otetaan huomioon käytössä syntyvät häviöt.

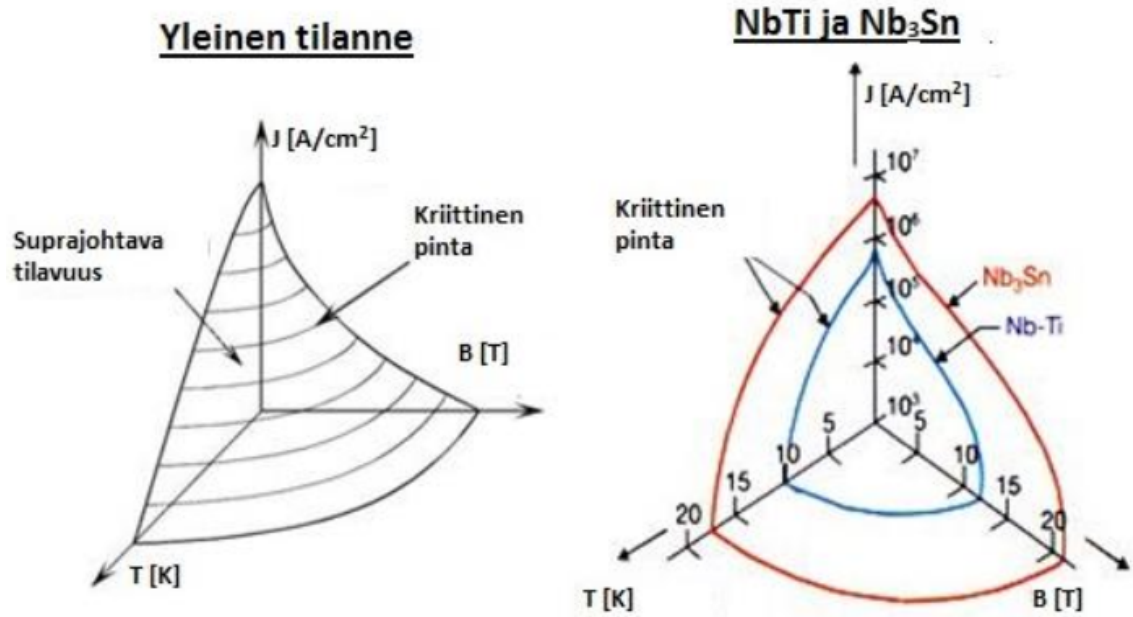
Käyttämällä kryojäähdyttimiä nesteiden sijaan olisi, ainakin joissakin tapauksissa, mahdollista säästää huomattavasti magneetin alkujäähdytyksessä ja vuotuisissa kustannuksissa. Lähteessä [24, s. 78] on arvioitu että tietyn tyyppisessä MRI-sovelluksessa käytettäessä kryojäähdyttimiä heliumin sijaan, vuotuiset kustannukset voisivat olla noin 50 % pienemmät ja alkujäähdytys maksaisi vain muutamia euroja. Toisaalta lämpöeristyksen tulee olla riittävä, jotta kryojäähdyttimen suhteellisen pienet jäähdytystehot ovat riittävät esimerkiksi 16–20 K:ssä.

Mitä alhaisempaan lämpötilaan mennään, sitä kalliimpia kryojäähdyttimiä tarvitaan. Tämä johtuu osaltaan siitä että alhaisissa lämpötiloissa kryojäähdyttimien lämmönvaihtimissa tarvitaan harvinaisia ja kalliita maametalleja, koska vain niiden ominaislämpökapasiteetit ja lämmönjohtavuudet ovat riittävän hyviä kyseisissä lämpötiloissa [54]. Harvinaisten maametallien käyttö parantaa jäähdyttimien jäähdytystehoa, kuten esimerkiksi lähteessä [54] tehty koe osoitti; käyttämällä GdAlO_3 (GAP) maametallia 3,3 kW kompressorilla toimivan pulssiputkijäähdyttimen 2. vaiheen lämmönvaihtimessa, nousi jäähdytysteho 165 mW:sta 250 mW:in 4,2 K lämpötilassa. Toisaalta myös jäähdytyksen huononeva teho alhaisissa lämpötiloissa vaatii suurempia kompressoreita, ja tämän hetken tehokkaimmat laitteet tuottavatkin vain noin 1,5 W jäähdytystehon 4,2 K lämpötilassa.

2.5 Lämpötilan vaikutus johdinkustannuksiin

Suprajohteiden kolme kriittistä ominaisuutta, kriittinen magneettivuon tiheys B_c , kriittinen sähkövirran tiheys J_c ja kriittinen lämpötila T_c riippuvat toisistaan. Kriittiset arvot muodostavatkin niin sanotun kriittisen pinnan kolmiulotteisessa koordinaatistossa, jonka alapuolella aine on suprajohtavassa tilassa. Tätä on hahmotettu kuvassa 2.5, jossa on myös nähtävissä niobititaanin ja niobitinan (Nb_3Sn) kriittiset arvot [29].

Tällä hetkellä kaupallisia suprajohtetyyppejä on kuusi: matalan lämpötilan suprajohteet (LTS) NbTi ja Nb_3Sn , sekä HTS-johteet $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ (Bi-2212), $(\text{Bi}, \text{Pb})_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$ (Bi-2223), $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) ja MgB_2 [47]. Suurimpina eroina HTS- ja LTS-materiaalien välillä ovat kriittiset lämpötilat ja materiaalien rakenteet. T_c on korkean lämpötilan suprajohteilla huomattavasti korkeampi kuin niobititaanilla ja niobitinalla. LTS-materiaalit ovat metalleja, kun taas HTS-materiaalit ovat keraameja, eli niiden käsittely ja johtimien valmistus on huomattavasti vaikeampaa ja kalliimpaa. Tämä onkin ollut yksi este HTS-johtimien yleistymiselle,



Kuva 2.5 Suprajohteiden kriittinen pinta [29].

mutta valmistustekniikoita on kyetty parantamaan ja nykyään niistä pystytäänkin valmistamaan laadukkaita.

Alentamalla toimintalämpötilaa voidaan kasvattaa suprajohteen kriittistä virrantiheyttä ja magneettikenttää. Mitä suurempi virrantiheys johtimeen saadaan, sitä vähemmän johdinta tarvitaan kuljettamaan sama määrä sähkövirtaa, eli ampeerikierrosten määrä pienenee. Toimintalämpötilaa alentamalla on siis mahdollista säästää johdinkustannuksissa. Myös kuparin (jota käytetään tavanomaisissa sähköjohtimisissa) resistiivisyys ρ_r pienenee lämpötilan funktiona, jolloin alhaisemmissa lämpötiloissa on mahdollista kuljettaa suurempi virta pienemmällä johdinkustannuksilla.

Koska toimintaolosuhteet ja eri johtimet vaikuttavat mahdollisen kuljetettavan virran arvoon, ei ole järkevää vertailla johtimien hintoja pelkästään pituusyksikön mukaan. Yleisesti käytetty yksikkö onkin €/kAm, eli johtimen pituusyksikön hinta verrattuna sen virrankuljetuskykyyn [76]. Taulukossa 2.6 on vertailtu kuparista, niobititaanista, niobitinasta ja Bi-2223-suprajohteesta valmistettujen johtimien tyypillisiä €/kAm arvoja eri toimintalämpötiloissa. Bi-2223-suprajohteen kriittinen lämpötila T_c on noin 110 K [49] ja Nb₃Sn:n noin 18 K [42].

Kuten nähdään, alentamalla toimintalämpötila 77 K:iin voidaan säästää jopa 50 %

Taulukko 2.6 Johtimien €/kAm arvoja [43, ss. 30–31].

T_{op} (K)	€/kAm			
	Cu	Bi-2223	NbTi	Nb ₃ Sn
298	64,5			
77	30,45	100		
66		62		
45	25,85			
30	23,54			
20		21		
10	20,5	17		
4,2			1–4 [27]	10–20 [27]

kuparin kustannuksissa. Tämän jälkeen säästö ei ole enää kovin merkittävä. Toisaalta korkean lämpötilan suprajohteen tapauksessa, toimittaessa noin 10 K lämpötilassa voi materiaalikustannukset laskea lähes kymmenesosaan. Niobititaanin yhteydessä voidaan myös parantaa J_c ja B_c arvoja alentamalla lämpötilaa. Mutta koska NbTi:n kriittinen lämpötila on vain noin 9,3 K, ei ero ole yhtä merkittävä kuin HTS-materiaaleilla.

Toisaalta toimintalämpötilan alentaminen aiheuttaa kustannuksia ja näin ollen vähentää materiaalisäästöistä saavutettua etua. Tämän takia investointikustannusten lisäksi tulee ottaa huomioon toiminnasta aiheutuvat kulut [65]. Monissa sovelluksissa onkin kyse kustannusten ja riittävän suorituskyvyn tasapainottamisesta, koska toimintalämpötilan alentaminen parantaa suprajohteiden kriittisiä arvoja, mutta alhaisempi lämpötila on yleensä kuitenkin kalliimpi ratkaisu.

3. MAGNEETTIKUVAUS JA MRI-MAGNEETTI

Kryogeenistä jäädytystä vaaditaan esimerkiksi käytännössä kaikkien magneettikuvauslaitteiden (MRI, Magnetic Resonance Imaging) toiminnassa. Magneettikuvauksella saadaan hyvin tarkkoja kuvia esimerkiksi ihmiskehosta ilman ionisoivaa säteilyä. Magneettikuvauslaitteet taas vaativat voimakkaita ja homogeenisiä magneettikenttiä mahdollisimman hyvälaatuisten kuvien muodostamiseen.

Magneettikuvaus perustuu niin sanottuun magneettiseen resonanssiin, joka eroaa merkittävästi esimerkiksi röntgensäteilystä tai radioaktiivisen atomin fotoniemisistä. MRI hyödyntää sähkömagneettisen säteilyn sijaan atomien ytimien käyttäytymistä magneettikentässä, eli niiden magneettisen momentin suuntaa ja liikettä kyseisessä kentässä. [26, s. 515]

Magneettikuvauslaitteessa potilas asetetaan vahvaan staattiseen magneettikenttään (yleensä noin 1–4 T). Magneettikuvauslaitteen päämagneetti on tyypillisesti onton sylinterin (solenoidi) muotoinen, jolloin potilas asettuu magneetin sisään, missä valitsee voimakkain ja tasaisin magneettikenttä. Tosin jotkin laitteet hyödyntävät erilaisia rakenteita, jotta lääkärit voivat suorittaa toimenpiteitä samanaikaisesti magneettikuvia katsoessaan. Lisäksi tarvitaan erillisiä magneettikäämejä tuottamaan ajallisesti vaihtelevia gradientteja magneettikenttään, sekä tuottamaan radiotaajuinen (RF, radio-frequency) signaali, joka saa aikaiseksi havaittavan magnetisaation muutoksen. Tämä hyvin heikko magnetisaation muutos voidaan havaita esimerkiksi erillisellä vastaanotinkäämillä. Magneettikuvauslaitteen rakennetta esitellään tarkemmin luvussa 3.2. [26, s. 515]

3.1 Magneettikuvaus

Magneettikuvauksessa havaitaan atomien ytimien muodostamat magneettiset dipolit (ihmisen tapauksessa vetyatomit). Dipolin voimakkuus voidaan mitata *magneettisena dipolimomenttina* ν [Am²]. Kun magneettinen dipoli joutuu ulkoiseen kent-

tään, tarvitaan ulkoinen momentti $\boldsymbol{\tau}_{\text{ext}}$ kumoamaan kentän aiheuttama momentti ja pitämään se tasapainossa. Jos taas dipoli on suuntautunut ulkoisen kentän mukaan, tätä ulkoista momenttia ei tarvita. Magneettikentän dipoliin aiheuttama momentti voidaan ilmaista kaavalla [26, s. 516]

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\nu} \times \mathbf{B}. \quad (3.1)$$

Atomien elektroneilla, protoneilla ja neutroneilla voi olla pyörimismäärä \mathbf{L} ja magneettinen momentti. Magneettinen momentti taas riippuu hiukkasen kulmaliikemäärästä ja se on samansuuntainen kulmaliikemäärän kiertoradan akselin kanssa positiivisille varauksille ja vastakkaisuuntainen negatiivisille varauksille. Sähköisesti varautuneilla hiukkasilla, eli protonilla ja elektronilla on myös luontainen magneettinen momentti, joka johtuu hiukkasen ”pyörimisestä” akselinsa ympäri, eli sen sisäisestä kulmaliikemäärästä, *spinistä* \mathbf{S} . Tämä voidaan ilmaista kaavalla

$$\boldsymbol{\nu} = \gamma \mathbf{S}, \quad (3.2)$$

missä γ on gyromagneettinen suhde, joka ilmaisee hiukkasen magneettisen momentin ja pyörimismäärän suhteen. [26, s. 517]

3.1.1 Magnetisaatio ja prekessio

MRI perustuu kudoksen magnetisaatioon \mathbf{M} . Näytteen magnetisaatio on sen keskimääräinen magneettinen momentti tilavuusyksikköä kohti. Ilman ulkoista kenttää, joka suuntaisi atomien ydinten spinejä, kokonaismagnetisaatio on nolla. Kun kudokseen tuodaan ulkoinen magneettikenttä \mathbf{B} , spineillä on taipumus suuntautua huolimatta niiden lämpöliikkeestä. Syntyvä kokonaismagnetisaatio kasvaa suhteessa ulkoisen kentän suuruuteen. Tarpeeksi voimakkaassa kentässä kaikki atomien magneettiset momentit suuntautuvat ja saavutetaan magnetisaation saturaatiopiste. Magnetisaatio voidaan laskea kertomalla kappaleen keskimääräinen magneettinen momentti spinien määrällä N tilavuusyksikköä kohti $\mathbf{M} = N \langle \boldsymbol{\nu} \rangle$. [26, s. 517]

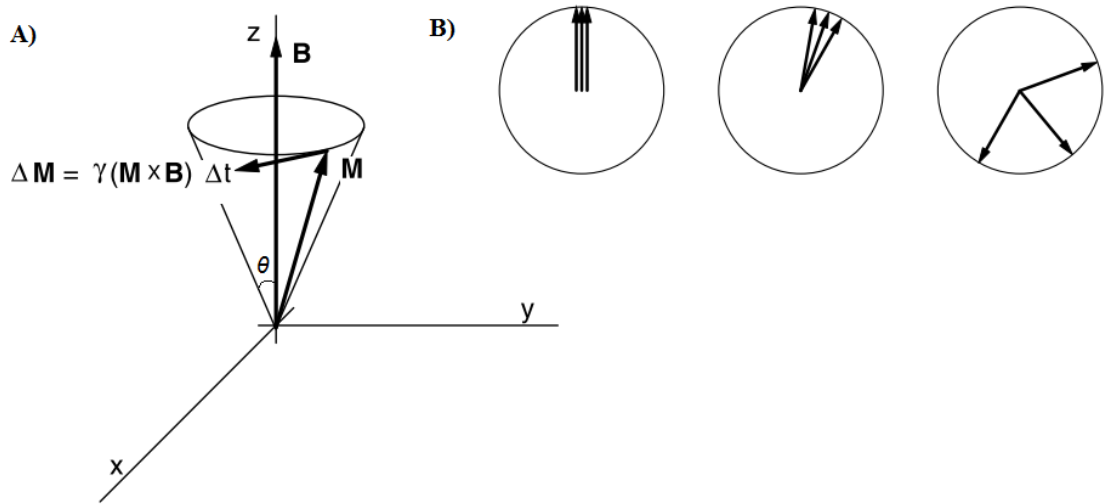
Kuvassa 3.1 on nähtävissä niin kutsuttu *prekessio*. \mathbf{M} ja $\langle \boldsymbol{\nu} \rangle$ pyörii \mathbf{B} :n ympärillä vakiokulmanopeudella ω ja \mathbf{B} :n nähden vakiokulmassa θ , kulmaliikemäärän pysyessä muuttumattomana [26, s. 518]. Tässä luvussa ulkoinen magneettikenttä \mathbf{B} on kiinnitetty z -akselin suuntaiseksi.

Yksi mahdollinen ratkaisu prekessiolle karteesisessä koordinaatistossa voidaan il-

maista kaavoilla [26, s. 518]

$$\begin{aligned} M_z &= M_{\parallel} = \text{vakio}, \\ M_x &= M_{\perp} \cos(-\omega t), \\ M_y &= M_{\perp} \sin(-\omega t), \end{aligned} \quad (3.3)$$

missä t on aika. Ylläolevia ratkaisuja kutsutaan *Larmorin prekessiotaajuudeksi*. Klassinen Larmorin taajuus on yhtä suuri kuin fotonien taajuus, joka vastaa $\nu\mathbf{B}$:n peräkkäisien arvojen välillä olevaa energiaa. [26, s. 518]



Kuva 3.1 A) Magnetisaation \mathbf{M} prekessio ulkoisen kentän \mathbf{B} ympärillä. Lyhyellä aikavälillä Δt on $\Delta\mathbf{M} = \gamma(\mathbf{M} \times \mathbf{B}) \Delta t$ B) Jos useampi spin prekessoi erisuuruisesti, kokonaisspin pienenee erivaiheisuuden takia. [26, s. 518]

3.1.2 Muuttuva magneettikenttä ja relaksaatio

Käyttämällä sinimuotoisesti vaihtelevaa magneettikenttää, manganettisen momentin prekessiosuuntaa voidaan muuttaa mielivaltaiseen kulmaan staattiseen kenttään \mathbf{B} nähden. kun vaihteleva kenttä poistuu, tapahtuu magnetisaation relaksaatio, eli prekessio palaa alkuperäiseen tilaansa, johon liittyy kaksi ominaista aikavakiota, pituus-suuntainen (t_1) ja poikittainen (t_2) relaksaatioaika.

Jos jokin staattisen kentän ulkopuolinen hetkellinen vaikutus muuttaa magnetisaatiota siten, että se ei osoita enää tasapainotilaan, joka voidaan valita mielivaltaisesti esimerkiksi z-akselin suuntaiseksi, saa lämpöliikkeen aiheuttama energiatilojen

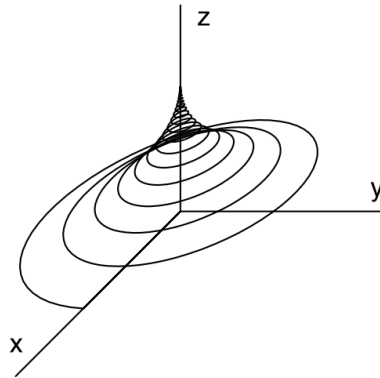
miehitysten muutos M_z :n palaamaan tasapainotilaan M_0 , eli \mathbf{B} :n suuntaiseksi. Jos tehdään oletus että energian siirtyminen on verrannollinen siihen kuinka kaukana magnetisaatio on tasapainotilasta, voidaan kirjoittaa yhtälö [26, s. 518]

$$\frac{dM_z}{dt} = \frac{1}{t_1}(M_0 - M_z). \quad (3.4)$$

Jos myös oletetaan että mahdollisesti syntyneet \mathbf{M} :n x- ja y-komponentit katoavat eksponentiaalisesti poikittaisessa relaksaatioajassa, voidaan kirjoittaa yhtälöt [26, s. 518]

$$\frac{dM_x}{dt} = -\frac{M_x}{t_2} \text{ ja } \frac{dM_y}{dt} = -\frac{M_y}{t_2}. \quad (3.5)$$

Oletus eksponentiaalisesta relaksaatiosta ei ole aina oikea, mutta se tehdään, jotta voidaan johtaa yhtälöt, jotka kuvaavat tilannetta jossa \mathbf{M} prekessoi xy-tasossa. Tätä prekessointia ja eri relaksaatioita on hahmotettu kuvassa 3.2. [26, ss. 518–519]



Kuva 3.2 M :n kärjen paikka relaksaation aikana kun se aluksi prekessoi xy-tasossa. [26, s. 519]

Kuvassa magnetisaatio on aluksi xy-tasolla M_0 ja se pienenee eksponentiaalisesti aikavakion t_2 mukaisesti. M_z on alkutilanteessa 0, jonka jälkeen se relaksoituu arvoon M_0 aikavakion t_1 mukaisesti. [26, ss. 518–519]

Poikittainen relaksaatioaika on aina lyhyempi kuin pituussuuntainen relaksaatioaika. Tämä johtuu siitä, että muutos z-suunnassa vaatii muutoksen potentiaalienergiassa, kun taas muutos joka tapahtuu xy-tasossa ei tätä vaadi. M_x ja M_y voivat muuttua samalla kun M_z :n arvo vaihtuu, mutta ne voivat muuttua myös muiden tapahtumien vaikutuksesta. Jos esimerkiksi järjestelmän atomien spinit prekessoivat hiukan eri taajuuksilla, tapahtuu vaihesiirtymä, jota on hahmotettu kuvassa 3.1 B). Tämä

ero prekessiossa voi johtua staattisen magneettikentän lokaaleista vaihteluista ja ajan myötä tapahtuvista muutoksista. Larmorin taajuudella prekessoivan systeemin kaikki \mathbf{M} :n komponentit ovat vakioita. [26, ss. 518–520]

Jos systeemiin tuodaan x-akselin suuntainen magneettikenttä $B_1 \cos(\omega t)$ joka oskilloi Larmorin taajuudella ω_0 , voidaan magnetisaatiolle kirjoittaa keskiarvotetut yhtälöt

$$\frac{dM_{x'}}{dt} = 0, \quad (3.6)$$

$$\frac{dM_{y'}}{dt} = \frac{\gamma B_1}{2} M_{z'}, \quad (3.7)$$

$$\frac{dM_{z'}}{dt} = -\frac{\gamma B_1}{2} M_{y'}. \quad (3.8)$$

Jos $M_{x'}$ on alkujaan 0, se pysyy nollana yhtälön 3.6 mukaisesti. Larmorin taajuudella oskilloiva magneettikenttä B_1 aiheuttaa kulmanopeuden

$$\omega_1 = \frac{\gamma B_1}{2}, \quad (3.9)$$

joka on huomattavasti pienempi kuin Larmorin taajuus, koska $B_1 \ll B_z$. [26, ss. 520–521]

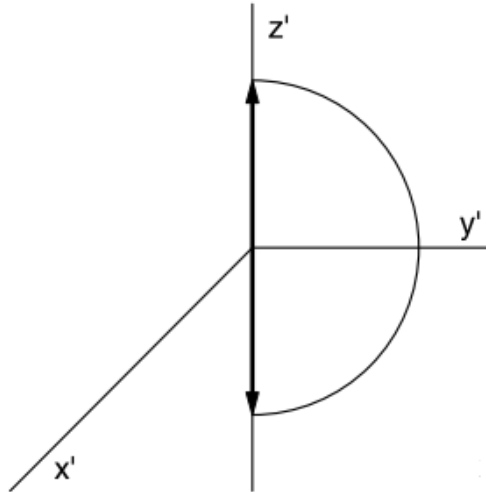
Käyttämällä ylläolevaa kulmanopeutta yhtälöissä 3.6–3.8 ja jos \mathbf{M} on alkujaan z-akselin suuntainen saadaan yhtälöt

$$\begin{aligned} M_{x'} &= 0, \\ M_{y'} &= M_0 \sin(\omega_1 t), \\ M_{z'} &= M_0 \cos(\omega_1 t). \end{aligned} \quad (3.10)$$

Tämän kaltaista prekessiota z-akselin ympäri yhdistettynä \mathbf{M} :n projektion muuttamiseen z-akselilla kutsutaan nutaatioksi. [26, s. 521]

Yhtälöryhmästä 3.10 nähdään että jos kenttää B_1 käännetään 90° neljänneosajaksoksi ($\pi/2$ pulssi) ω_1 :sta nutatoi \mathbf{M} $x'y'$ tason suuntaiseksi. Jos taas käännös on 180° (π pulssi) nutatoi \mathbf{M} z-akselin suuntaiseksi. Kuvassa 3.3 on nähtävissä π pulsin magnetisaatioon aiheuttama nutaatio. [26, s. 521]

Taulukossa 3.1 on joitakin arvioita relaksaatioajoille kehon eri materiaaleissa mielivaltaisesti valitulle Larmorin taajuudelle 20 MHz. Lähekkäin olevat paramagneet-



Kuva 3.3 180° , eli π pulssin aiheuttama nutaatio. M kääntyy z -akselin suuntaiseksi. [26, s. 521]

tiset hiukkaset pienentävät relaksaatioaikaa, koska ne aiheuttavat enemmän muutoksia magneettikentässä. Esimerkiksi lisäämällä 20 ppm Fe^{3+} molekyyliä veteen, alenee t_1 3000:sta 20:een millisekuntiin.

Taulukko 3.1 Arvioituja relaksaatioaikoja 20 MHz Larmorin taajuudella [26, s. 523].

	t_1 (ms)	t_2 (ms)
Veri	900	200
Lihäs	500	35
Rasva	200	60
Vesi	3000	3000

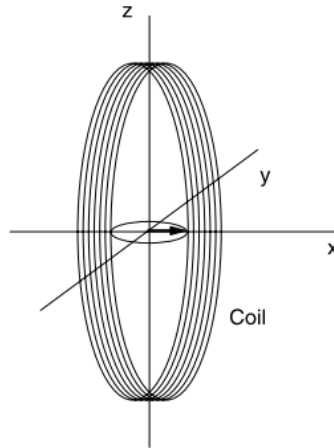
Eri relaksaatioajat voidaan havaita magneettikuvasta. Tähän perustuu myös kontrastiaineiden käyttö magneettikuvauksessa. Esimerkiksi vahvasti paramagneettista gadoliniumia (Gd^{3+}) käytetään usein pienentämään läheisten atomien relaksaatioaikoja. [26, s. 523]

3.1.3 Signaalin havaitseminen ja kuvan tuottaminen

Magnetisaatio joka pyörii xy -tasossa voidaan siis tuottaa käyttämällä z -akselin suuntaista staattista magneettikenttää ja käämiä, johon syötetään vaihtovirtaa Larmorin

taajuudella ω_0 . Kun käämiin syötetään virtaa aikoina $\Delta t = \pi/2\omega_1 = \pi/\gamma B_1$ (90° tai $\pi/2$ pulssi) magnetisaatio nutatoituu xy -tasolle [26, ss. 524–525]. Tätä käämillä tuotettua pulssia kutsutaan myös radiotaajuiseksi (RF, radio-frequency) pulssiksi. RF-signaalin kesto on noin 2-3 aallonpituutta [17, s. 278].

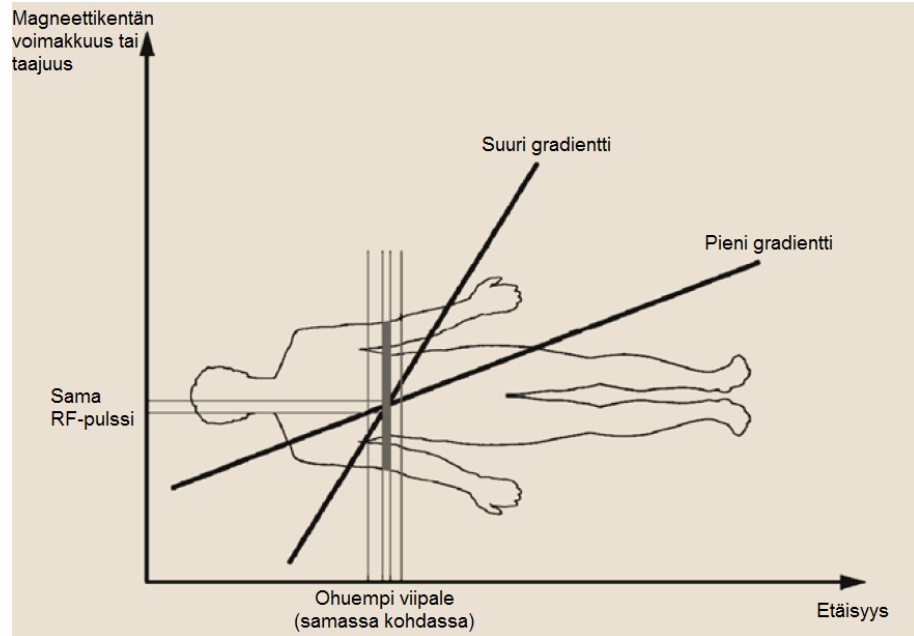
Kun generaattori on pois päältä, voidaan samaa käämiä käyttää havaitsemaan xy -tasossa prekessoivien magneettimomenttien aiheuttamaa muuttuvaa magneettivuota. Havaittava signaali on eksponentiaalisesti vaimeneva siniaalto, ja sitä kutsutaan vapaan induktion vaimenemiseksi (FID, Free Induction Decay). Pyörivän magneettimomentin synnyttämää jännitettä käämissä on hahmotettu kuvassa 3.4. Käämiin indusoituvan sähkömotorisen voiman suuruus on verrannollinen koko kuvattavan kohteen \mathbf{M} :n vapaan induktion vaimenemiseen. FID-menetelmän lisäksi on muitakin tapoja synnyttää ja mitata RF-signaaleja, kuten IR (inversion-recovery), joka mahdollistaa t_1 -ajan mittaamisen. [26, ss. 524–525]



Kuva 3.4 xy -tasossa pyörivä magneettimomentti indusoi jännitteen yz -tasossa olevaan vastaanotinkäämiin [26, s. 524].

Magneettikuvaus on mahdollista useilla eri tekniikoilla, mutta kuvan muodostaminen vaatii aina staattisen kentän ja RF-pulssin lisäksi gradienttien lisäämistä staattiseen kenttään, jota ne joko vahvistavat tai heikentävät. Ensimmäinen gradientti lisätään z -suuntaan $\pi/2$ pulssin aikana siten, että esimerkiksi kuvattaessa potilasta pään alueella on suurin magneettikentän voimakkuus ja jaloissa pienin, jolloin myös Larmorin taajuus vaihtelee kuvattavan alueen z -suuntaisella akselilla. Tämä mahdollistaa ”viipaleen” valinnan kuvattavasta kohteesta, jolloin ainoastaan valitun alueen spinit nutatoituu xy -tasolle RF-pulssin vaikutuksesta, muun osan kohteesta pysyessä ennallaan. Gradientin voimakkuudella voidaan vaikuttaa kuvattavan

viipaleen paksuuteen: jyrkkä gradientti tuottaa ohuemman alueen. RF-pulssin taajuudella voidaan taas vaikuttaa kuvattavan viipaleen sijaintiin. Edellisen kaltainen menetelmä mahdollistaa kerroksittaisen kuvan muodostamisen esimerkiksi ihmisen kehosta ja sitä on hahmotettu kuvassa 3.5. [74, ss. 22–23]



Kuva 3.5 Gradientin suuruuden ja RF-pulssin taajuuden vaikutus magneettikuvan muodostamiseen [74, s. 23].

Tämän jälkeen alueelle lisätään x- ja y-suuntaiset gradientit, koska kuvan muodostamiseen tarvitaan tarkkoja paikkatietoja kuvattavasta kohteesta. Tämä onnistuu juurikin x- ja y-suuntaisilla gradienteilla, koska myös ne aiheuttavat Larmorin taajuuden muutoksia riippuen paikasta. Tämä taajuuksien jakauma on havaittavissa vastaanotettavasta signaalista. [26, ss. 527–529]

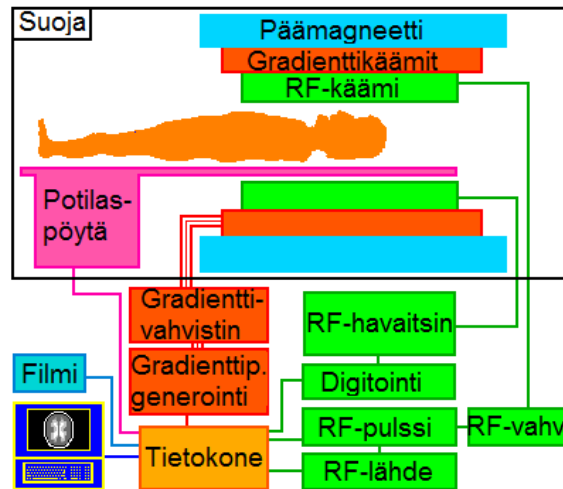
3.2 MRI-laitteen rakenne

Magneettikuvauslaitteen kallein komponentti on sen suprajohtava päämagneetti, jolla saadaan aikaan staattinen magneettikenttä B_0 [28]. Tämän lisäksi laitteessa on vähintään kolme gradienttikäämiä, RF-käämi ja mahdollisesti erillinen vastaanotinkäämi, jos RF-käämiä ei käytetä tähän tarkoitukseen.

Päämagneetti koostuu usein myös useammasta erillisestä käämistä, jotta magneettikentästä saadaan mahdollisimman tasainen kuvattavalla alueella (kuvista tulee pa-

rempilaatuisia). Magneettikentän homogeenisuus onkin yksi tärkeä huomioitava asia lääketieteellisessä magneettikuvauksessa. Kentän homogeenisuus ilmaistaan usein ppm:nä tietyn etäisyyden yli suhteessa pääkenttään ja sen tulisi olla alle 0,0005 % kyseisessä tilavuudessa [74, ss. 42–43].

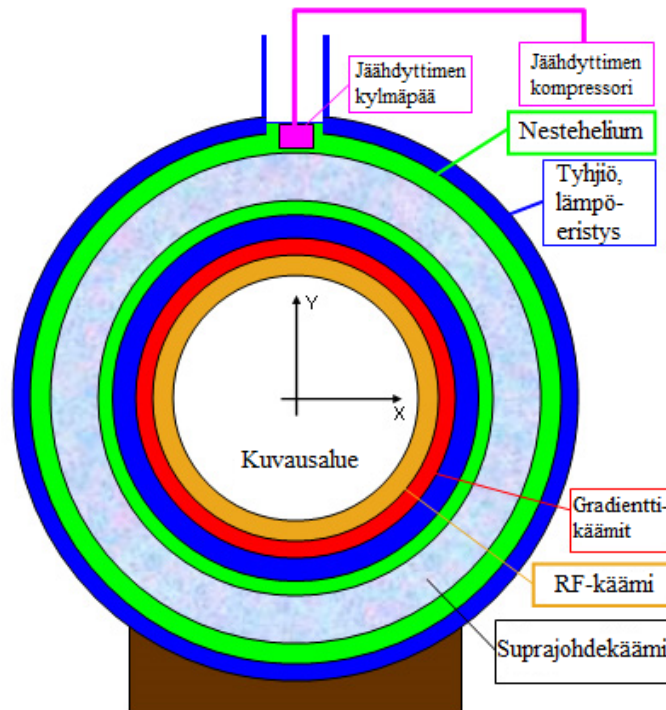
Gradienttikäämeillä synnytetään kuvan muodostamisessa vaaditut gradientit x-, y- ja z-suuntiin. RF-käämillä taas synnytetään spinejä kääntävä magneettipulssi B_1 ja mahdollisesti vastaanotetaan nutatoituneen magnetisaation indusoima jännite. Kuvattava kohde (esimerkiksi potilas) asetetaan yleensä magneetin sisään kuvauspöydälle kuvan 3.6 mukaisesti. [28]



Kuva 3.6 Magneettikuvauslaitteen rakenne [28].

Kuvaushuone ympäröidään niin sanotulla RF-suojalla, joka pysäyttää magneettikuvauslaitteen RF-signaalin leviämisen ja estää laitetta havaitsemasta ulkopuolelta tulevia RF-signaaleja. Magneettikuvauslaitteessa käytetään usein myös magneettisuoja, joka estää magneettikentän leviämisen ympäristöön. Hajakentän syntyä laitteen ulkopuolelle voidaan pienentää myös toisiokäämeillä, joiden magneettikenttä on vastakkaisuuntainen päämagneettikentän kanssa. Magneettikuvauslaitetta hallinnoi tietokone, joka huolehtii esimerkiksi RF-pulssin ja gradienttikenttien muodosta ja ajoituksesta. RF-signaalia varten tarvitaan myös vahvistin, jolla signaalin teho voidaan nostaa milliwateista kilowatteihin. [28]

Kuvassa 3.7 näkyy tyypillisen nestemäistä heliumia jäähdytykseen käyttävän MRI-laitteen poikkileikkaus, sekä yleisesti käytetty tapa jäähdyttää säteilysuojia kryojäähdyttimellä. [28]



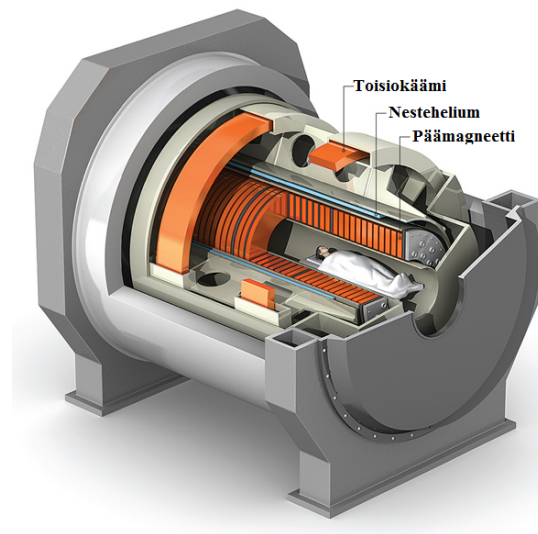
Kuva 3.7 Tyypillisen magneettikuvauslaitteen poikkileikkaus. Kryojäähdytін kiinnitetty säteilysuojaan. [28]

3.2.1 Päämagneetti

Suurin osa magneettikuvauslaitteiden päämagneeteista on valmistettu suprajohdeista (noin 95 % kaikista olemassa olevista MRI-järjestelmistä, ja uusista kaikki [74, s. 43]). Sähkömagneeteilla saavutettavat magneettikentät ovat kuvausalueella suurimmillaan vain noin 0,3 T ja ne vaativat suuren määrän jatkuvaa tehoa, jolloin käyttökustannukset ovat korkeat. Ongelmana on myös syntyvän kentän epähomogeenisuus. Kestomagneetitkaan eivät sovi suurimpaan osaan MRI-laitteita, koska niillä saavutetaan vain noin 0,5 T vuontiheyksiä kuvausalueella ja ne ovat vaikeasti säädettävissä. Tyypillinen magneettivuontiheys sairaalakäytössä on 1,5–3 T. [74, s. 43]

Suurimmissa laitteissa voidaan saavuttaa yli 10 T kenttiä, kuten INUMAC:issa (Imaging of Neuro disease Using high-field MR And Contrastophores), jonka päämagneetti tuottaa 11,75 T magneettivuontiheyden. Vertailun vuoksi esimerkiksi Cernin LHC (Large Hadron Collider) käyttää 8,4 T magneettikenttiä. INUMAC-laitteen päämagneettiin on käytetty 170 kilometriä niobititaani johdinta ja jäähdytykseen

käytetään nestemäistä heliumia. Laitteen rakenne on nähtävissä kuvassa 3.8. [64]



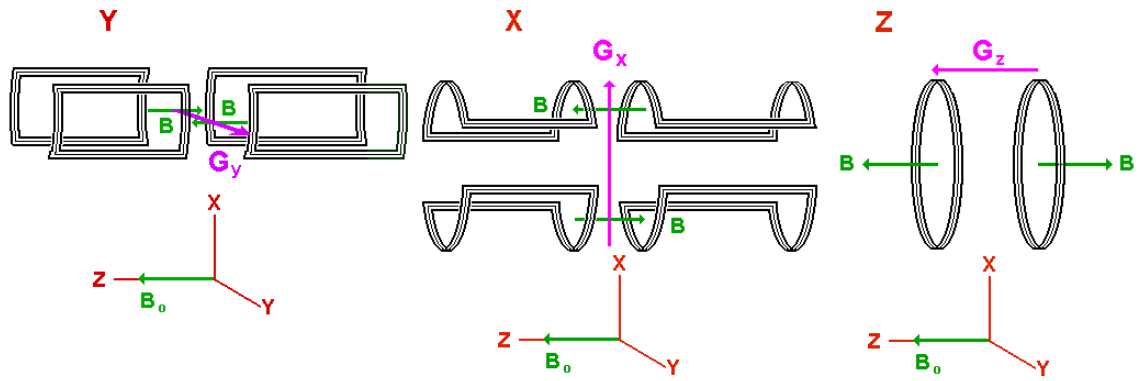
Kuva 3.8 INUMAC-kuvauslaitteen rakenne. Ihminen mukana vain mittakaavan takia, laitetta ei todellisuudessa käytetä potilaiden kuvaamiseen. [64]

Vuonna 2013 INUMAC:in valmistus- ja suunnitteluprosessin arvioitiin maksavan noin 200 miljoonaa euroa. Päämagneetissa käytetyn suprajohtimen valmisti Luvata Oy. Yhtiö valmisti myös kahden hajakenttien leviämistä estävän toisiokäämin vaatimat 58 km NbTi-johdinta. NbTi:n tapauksessa 12 T kentän saavuttamiseen vaaditaan noin 1500 A virta ja supranesteen käyttöä, eli heliumin joka on jäähdytetty 1,8 kelviniin. [64]

3.2.2 Gradienttikäämit

Päämagneetista poiketen gradienttikäämit ovat yleensä huoneen lämpötilassa toimivia sähkömagneetteja. Tyypillisin magneettikuvauslaitteen rakenne on kuvan 3.7 mukainen sylinteri. Tällaisessa laitteessa z-suuntainen (sylinterin akselin suunta) magneettikentän gradientti saadaan aikaiseksi antihelmholtz-tyyppisellä käämiratkaisulla, eli kahdessa vierekkäisessä käämissä on erisuuntainen virta, jolloin niiden väliseen magneettikenttään syntyy gradientti. Toisen käämin magneettikenttä vahvistaa staattista magneettikenttää B_0 , kun taas toinen heikentää sitä. [28]

Gradientit x- ja y-suuntiin saadaan aikaiseksi käyttämällä monimutkaisempaa käämigeometriaa. Kaikkien kolmen käämin periaatteellinen rakenne on nähtävissä kuvassa 3.9. [28]



Kuva 3.9 Sylinterimuotoisen MRI-laitteen gradienttikäämien periaatteellinen rakenne [28].

Gradienttikäämien synnyttämät magneettikentät ovat pieniä verrattuna päämagneettiin, mutta nekin vaativat usean sadan ampeerin virtoja. Tästä huolimatta gradienttikenttien tulee olla erittäin vakaita, jotta kuvaan ei synny häiriöitä. Tyypillinen gradienttikäämin synnyttämä gradientti on noin 20–100 mT/m. [74, s. 44]

Magneettikuvauslaitteiden pitämä hakkaava ääni syntyy gradienttikäämien käynnistämisestä ja sammuttamisesta. Tätä voidaan verrata tavalliseen kaiuttimeen; kaiutin ja gradienttikäämit sisältävät magneettikentän sisällä olevan kelan, joka pyrkii liikkumaan kun virta kytketään päälle ja pois päältä. [74, s. 44]

3.2.3 RF-järjestelmä

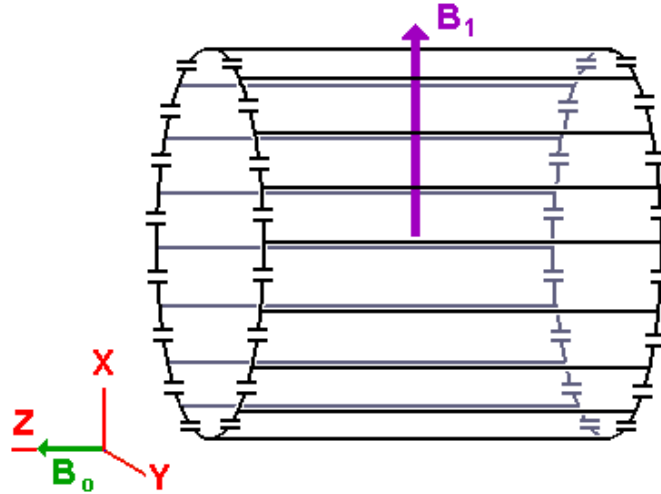
RF-järjestelmä sisältää voimakkaan RF-generaattorin ja vastaanottimen. Larmorin taajuus 1,5 T kentässä on noin 63,8 MHz, joka on saavutettavissa FM-lähettimillä (Frequency Modulation, taajuusmodulaatio). Lähettimen ja vastaanottimen tulee olla vakaita ja häiriöttömiä, koska paikkatietoja varten tarvitaan signaalin taajuus ja vaihe. Esimerkiksi vastaanottimen aiheuttama vaihesiirto signaalissa aiheuttaisi sumean kuvan. [74]

Generaattorin ja vastaanottimen lisäksi järjestelmä sisältää lähetys- ja vastaanotinkäämin. Vastaanotinkäämi voi olla erillinen tai sama jolla RF-signaali synnytetään. [74]

RF-käämejä voidaan valmistaa useilla eri geometrioilla, joista tyypillisimmät voidaan jakaa tilavuus- ja pintakäämeihin. Pintakäämit ovat suosittuja, koska ne ovat

vain vastaanottimia ja niillä on hyvä signaali-kohina suhde, tosin niiden tarkkuus heikkenee mitä kauempana kuvattava kohde on. [28]

Yleisimmin käytetty tilavuuskäämi on niin kutsuttu lintuhäkki, eli harva, sylinterin muotoinen käämi, jota on hahmotettu kuvassa 3.10. Tätä käämityyppiä käytetään erityisesti pään alueen ja aivojen magneettikuvaukseen. [28]



Kuva 3.10 Lintuhäkkikäämi [28].

RF-generaattorin teho on tyypillisesti säädettävä, mutta suurimmissa kokovartalon kuvaukseen tarkoitetuissa laitteissa sen maksimiteho voi olla jopa 35 kW ja jatkuva teho 1 kW. Vaikka RF-pulssien taajuudet ovat korkeita, ne eivät juurikaan synnytä radiotaajuisia häiriöitä. Tämä johtuu siitä että RF-käämi ei ole radiolähetin, vaan se synnyttää pääosin vain lähikentän. Toisin sanoen RF-lähetin ei synnytä juurikaan sähkömagneettista säteilyä, vaan suurin osa tehosta pysyy lähellä käämiä. [55]

RF-käämin toiminta perustuu siis pulssiin, joka aiheuttaa myös muutoksia magneettikentässä. Muuttuva magneettikenttä taas generoi pyörrevirtoja magneettisissa aineissa, kuten usein suprajohteiden matriisimetallina käytetyssä kuparissa. Pyörrevirrat aiheuttavat häviöitä, jotka synnyttävät lämpöä ja pahimmillaan voivat johtaa suprajohtemagneetin quenchiin.

3.3 MRI-magneetin mekaaninen jäähditys

MRI-laitteiden jäähditys on pääsääntöisesti toteutettu nestemäisellä heliumilla. Helium taas on kallista ja sen hinnan voi olettaa vain nousevan tulevaisuudessa kysyn-

nän lisääntyessä. Toisaalta nestemäinen jäähdytys vaatii myös suuren kryostaatin, joka vie tilaa ja tekee laitteesta monimutkaisemman. Magneetin ensimmäinen jäähdytys toimintalämpötilaansa voi myös kuluttaa suuria määriä jäähdytysnestettä.

Kryojäähdyttimiä voidaan käyttää esimerkiksi MgB_2 -johtimesta valmistetun magneetin jäähdytykseen, josta esimerkkinä on Paramed Medical Systemsin valmistama MrOpen magneettikuvauslaite [56]. MrOpenin päämagneettikenttä on 0,5 T suuruisen kriittisen virran ollessa 1000 A, ja koko laitteeseen on käytetty 18 km johdinta. Laite on nähtävissä kuvassa 3.11. [23, 57]



Kuva 3.11 MrOpen magneettikuvauslaite [57].

Kryojäähdyttimien jäähdytysteho 4,2 K:ssä on kohtuullisen pieni, parhaimmillaan vain noin 1,5 W. Tämän takia, jos esimerkiksi niobititaanijohtimesta valmistettua magneettia jäähdytettäisiin kryojäähdyttimellä, tulisi eristyksen kylmimmän osan ympärillä olla erittäin hyvä. Tätä voitaisiin helpottaa käyttämällä toista (tai saman jäähdyttimen toista vaihetta) jäähdytintä jäähdyttämään säteilysuoja esimerkiksi 77 K lämpötilaan. Kuten jo luvussa 2.1 esitettiin, on lämpökuorma 4,2 K:iin 77 kelviniä huomattavasti pienempi kuin huoneen lämpötilasta.

3.4 Muut mekaanisen jäähdytyksen sovelluskohteet

Monet sovellukset ja järjestelmät vaativat alle 120 K lämpötiloja joko toimiakseen tai parantamaan toiminnan hyötysuhdetta. Tällaisia ovat jo esitellyn magneettikuvaus-

sen ja suprajohtavien magneettien lisäksi esimerkiksi infrapunasensorit, maakaasun nesteytys, jakelu ja kuljetus, elektroniikassa käytettyjen puolijohteiden jäädytys, jotkin lääketieteelliset menetelmät, kryopumput ja erilaiset avaruussovellukset. [44]

Viimeisen 20 vuoden aikana kryojäädyttimissä on tapahtunut merkittävää kehitystä. Varhaiset kryojäädyttimet olivat tehottomia ja niiden käyttöikä oli hyvin lyhyt. Iso osa jäädyttimien kehityksestä on tapahtunut avaruussovelluksia varten, mistä ne ovat myöhemmin siirtyneet myös kaupallisiin laitteisiin. Kehitystä on tapahtunut kaikille viidelle jäädytintyyppille, mikä on mahdollistanut niiden käytön sovelluksissa, jotka eivät olleet aikaisemmin järkeviä. Järjestelmät pääosin pienevät ajan myötä, joten myös kryojäädyttimiä pyritään jatkuvasti valmistamaan pienemmässä mittakaavassa. [60]

Myös suprajohtavilla magneeteilla on muita mahdollisia sovelluskohteita magneetikuvauksen lisäksi, kuten separointimagneetit, induktiokuumentimet, energian varastointijärjestelmät (SMES, Superconducting Magnetic Energy Storage), suurennuslaitteet, mittausjärjestelmät (kuten LHC), muuntajat ja moottorit. Suprajohteita voidaan käyttää myös energian siirtoon. Suprajohtavilla magneeteilla toteutettuja generaattoreita voitaisiin käyttää esimerkiksi tuulivoimaloissa, koska niistä saadaan pienempiä ja niiden hyötysuhde on parempi tavanomaisiin sähkögeneraattoreihin verrattuna [4]. Suprajohtavia moottoreita olisi taas mahdollista käyttää esimerkiksi laivojen moottoreina [53], edellä mainituista syistä.

Stirling-kryojäädyttimet olivat ensimmäisiä avaruussovelluksissa onnistuneesti käytettyjä jäädyttimiä. Erityyppisiä kryojäädyttimiä on käytetty useissa eri avaruustehtävissä, kuten tutkimusluotain UARS/ISAMS:issa (2 stirling-jäädytintä), joka mittasi tyypin katalysoivaa vaikutusta otsoniin sekä muita tapahtumia keski-ilmakehässä. EOS/AIRS luotaimessa on taas käytössä kaksi pulssiputki-jäädytintä. Luotaimen tehtävänä on tutkia maan ilmastoa. [72]

Infrapunasensorit vaativat alhaisia lämpötiloja toimiakseen. Yksi esimerkki infrapunasensoreiden käytöstä on ohjusvaroitussysteemit (MWS, Missile Warning Systems). MWS:ien yksi tärkeä vaatimus on kohtuullisen lyhyt jäähtymisaika, jotta järjestelmä on käytettävissä tarvittaessa. Tämän lisäksi järjestelmässä voidaan tavoitella luotettavuutta, pientä kokoa, hyvää hyötysuhdetta tai mahdollisimman hyvää lämmönpoistoa. [20]

4. KOEJÄRJESTELY JA MAGNEETTIEN LÄMPÖVERKKOMALLIT

Tämän työn päätarkoituksena oli selvittää Tomi Anttilan diplomityössä [1] valmistettujen kolmen magneetin eri suuntaiset lämmönjohtavuudet, joiden määrittämiseksi suoritettiin sarja koemittauksia. Mittaukset suoritettiin Tampereen teknillisen yliopiston kryolaboratoriossa ja niissä käytettiin kryojäähdytintä sekä tyhjiöeristettyä kryostaattia. Saaduista tuloksista käämien lämmönjohtavuudet määritettiin Comsol Multiphysics ohjelmalla [9] tehdyillä tietokonemalleilla. WIC-johtimia, joista tässä työssä tutkitut magneetit on valmistettu, voitaisiin mahdollisesti käyttää esimerkiksi mekaanisesti jäähdytetyn MRI-laitteen päämagneetin valmistuksessa.

Lämmönjohtavuus on tärkeä parametri, koska sillä on merkittävä vaikutus magneetin toimintaan ja jäähdytykseen. Lämmönjohtavuudesta riippuu esimerkiksi se, kuinka paljon jäähdytysteho vaaditaan tietyn lämpötilan saavuttamiseen (kryostaatin eristyksen pysyessä vakiona) ja kuinka nopeasti järjestelmässä mahdollisesti syntyvä lämpö poistuu käämistä. Nopeampi reagointi ympäristössä tapahtuviin muutoksiin voi helpottaa käämin suojausten toteuttamista ja pienempi jäähdytysteho alentaa jäähdytyksen kustannuksia.

4.1 Koekäämit

Mittaukset suoritettiin magneeteille jotka on käämitty Luvata Oy:n valmistamasta “wire-in-channel” (WIC) niobititaanisuprajohtimesta. Johdintyyppissä suprajohtava komposiittijohdin on sijoitettu kupariseen kanavaan. Rakennetta on hahmotettu kuvassa 4.1, jossa on MRI-magneettiin tarkoitetun 84 säikeisen WIC-johtimen poikkileikkaus [41].

Kanavassa oleva komposiittijohdin koostuu kupariin upotetuista niobititaanisäikeistä ja joissakin johdintyypeissä se on sähköisesti eristetty kuparikanavasta. Johtimen



Kuva 4.1 MRI-magneettiin tarkoitettun 84 säikeisen WIC-johtimen poikkileikkaus [41].

niin sanottu *alfa-arvo*, eli suprajohteen suhde kupariin on noin 29 ja kuparin *RRR-arvoksi* on ilmoitettu 100 [1, s. 28]. RRR-arvolla kuvataan kuparin resistiivisyyden suhdetta huoneen lämpötilan (esimerkiksi 293 K) ja 4,2 K:in (voi olla myös esimerkiksi 10 K) välillä [3]. Mitä suurempi arvo on, sitä pienempi resistiivisyys on kylmässä lämpötilassa verrattuna huoneenlämpötilan resistiivisyyteen, jolloin kupari on myös puhtaampaa [3].

Käämejä on kolme, joissa kaikissa on käytetty eri tavalla eristettyä WIC-johdinta. Ensimmäisessä käämissä (1) koko WIC-johdin on eristetty PET-eristeellä eikä ydinlankaa ole eristetty kanavasta. Toisessa käämissä (2) kanavat ovat eristämättömiä, eli ne ovat suorassa kontaktissa viereisten kerrosten ja kierrosten kuparikanavien kanssa. Kolmannessa (3) kuparikanavat on päällystetty ohuella lakkaeristekerroksella. Käämeissä 2 ja 3 myös ydinlanka on sähköisesti eristetty kuparikanavasta. Eristyksen tarkoituksena oli pääasiallisesti vaimentaa käämeissä syntyviä pyörrevirtoja, ja tässä työssä pyritään selvittämään minkälainen vaikutus eri eristeillä on testimagneettien lämmönjohtavuuksiin ja syntyviin pyörrevirtoihin. [1, ss. 28–29]

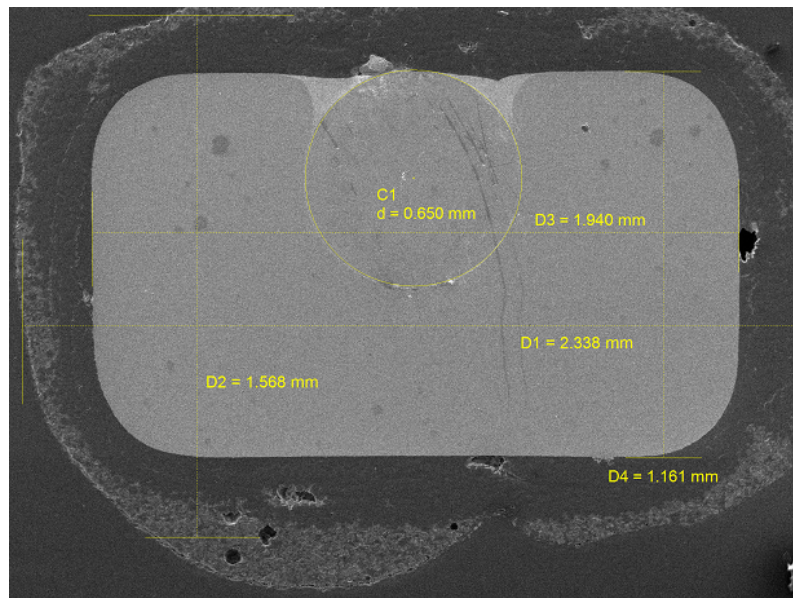
Kaikki magneetit on valmistettu niin sanotulla *wet layer*-menetelmällä, eli johdin-kerrosten väliin on lisätty Stycast 2850 FT-epoksia. Toisin sanoen käämi on impregnoitu, jotta johdin ei pääsisi liikkumaan *Lorentz*-voimien vaikutuksesta ja näin aiheuttamaan lämpöä ja mahdollisesti quenchia. Epoksi vaikuttaa käämin sähkön- ja lämmönjohtavuuteen, eikä sen tarkkaa paksuutta ole pystytty arvioimaan [1, s. 29]. Myös käämien ulkopinta on epoksin peitossa. Käämien ylä- ja alaosassa on noin 13 mm paksuinen kerros epoksia ja sisäosalla noin 10 mm. Tämä johtuu siitä, että käämeistä haluttiin tehdä mahdollisimman adiabaattisia. Myös ulkosäteen puolei-

sella pinnalla on hyvin ohut kerros epoksia.

4.2 Käämien rakenne

Kuvissa 4.2, 4.3 ja 4.4 on nähtävissä elektronimikroskoopilla otetut poikkileikkaukset eri langoista. Tässä luvussa esitetyt johtimien dimensiot ovat lähteessä [1] esitettyjä arvioita. Todellisuudessa johtimet eivät ole kaikkialta täysin saman kokoisia, kuten elektronimikroskoopilla otetuista kuvista nähdään.

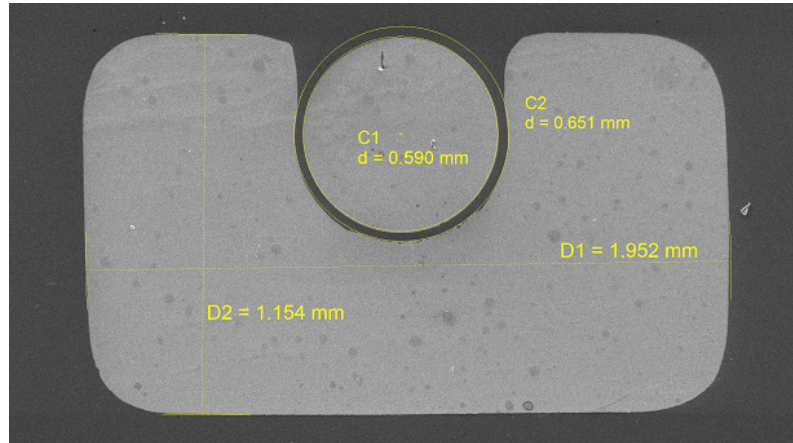
Käämin 1 WIC-johdin on muita käämejä paksumpi käytetyn PET-eristeen takia. Tämän johdosta myös valmistetun magneetin dimensiot ovat muita suuremmat. PET-eristeen paksuus on noin $140\ \mu\text{m}$, ja koko johtimen leveys eristeen kanssa on noin $2,240\ \text{mm}$ ja korkeus noin $1,458\ \text{mm}$. Ydinlanka on kuparikanavasta eristämätöntä ja paksumpaa kuin muissa käämeissä, halkaisijian ollessa $0,65\ \text{mm}$. [1, s. 29]



Kuva 4.2 PET-eristetyn johtimen poikkileikkaus.

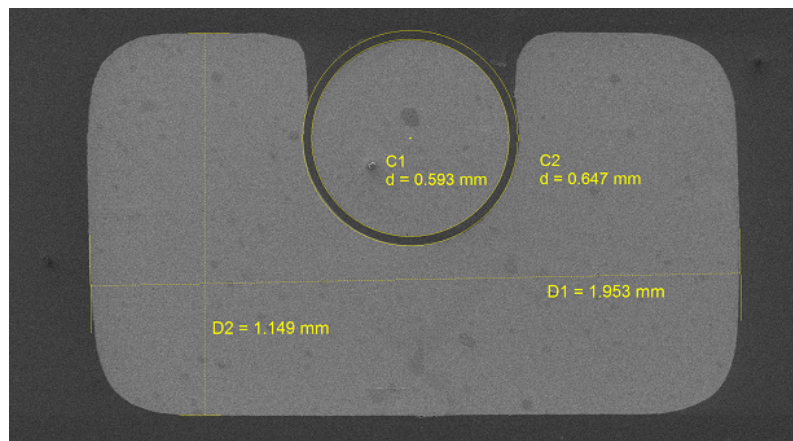
Käämissä 2 käytetyn johtimen leveys on $1,972\ \text{mm}$ ja korkeus $1,169\ \text{mm}$. Ydilanگان halkaisija on $0,6\ \text{mm}$ ja se on Formvar-eristetty kuparikanavasta. Ydilanگان eristekerroksen paksuus on noin $10\ \mu\text{m}$. [1, s. 29]

Käämin 3 johdin on arvioitu noin $20\text{--}30\ \mu\text{m}$ paksummaksi kuin käämissä 2 ohuen lakkaeristeen takia [1, s. 29]. Eristeen kanssa johtimen leveys on $2,002\ \text{mm}$ ja korkeus



Kuva 4.3 Eristämättömän johtimen poikkileikkaus.

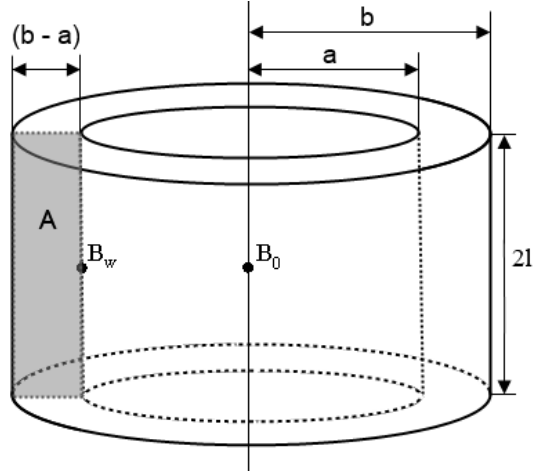
1,199 mm. Ydinlanka on myös Formvar-eristetty ja eristyksen paksuus on noin 10 μm . [1, s. 29]



Kuva 4.4 Lakkaeristetyin johtimen poikkileikkaus.

Kuten kuvasta 4.4 nähdään, ei lakkaeristystä havaittu elektronimikroskoopilla. Tähän voi olla syynä johdinnäytteiden impregnointi epoksiin kuvausta varten, jolloin kahta elektronimikroskoopissa hyvin samalta näyttävää ainetta ei kyetty erottamaan toisistaan. Toisaalta optisella mikroskoopilla tarkasteltaessa huomattiin, että lakkaeristys ei ole levittäytynyt tasaisesti johtimien pinnalle, vaan siinä on havaittavissa pisaramaisuutta, johtuen luultavasti lankojen käsittelytavasta (lakka levitetty suihkepulloista). Toisaalta eristyksen tavoitteena oli pitää langat erillään toisistaan, jolloin myös pisaramainen pinta toimii ja arvio eristeen paksuudesta on luultavasti riittävän tarkka.

Koekäämit ovat solenoidin muotoisia. Kaikissa käämeissä on sama määrä kierroksia N_{tot} , mutta johtuen eri tyyppisistä eristeistä, käämissä 1 on hiukan enemmän johdinta. Kuvassa 4.5 on hahmotettu koemagneettien sisäsäde a , ulkosäde b , korkeus $2l$ ja poikkileikkauksen pinta-ala A .



Kuva 4.5 Koemagneetin sisäsädettä a , ulkosädettä b , korkeutta $2l$, sekä poikkileikkauksen pinta-alaa A hahmottava kuva [1, s. 30].

Taulukossa 4.1 on koottuna mittauksissa käytettyjen magneettien dimensiot, johdinkierrosten määrät, johtimen kokonaispituus j_{tot} sekä massat m . [1, s. 31]

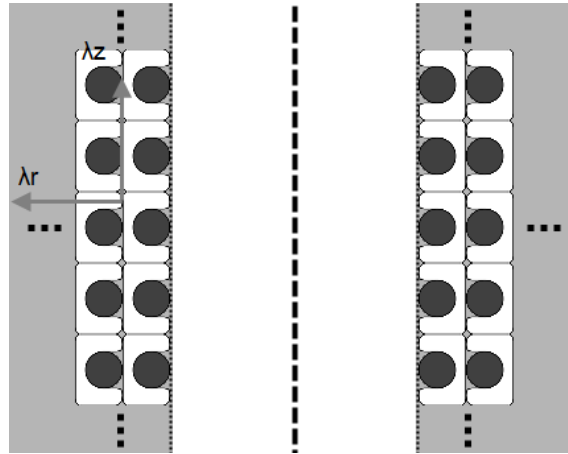
Taulukko 4.1 Mittauksissa käytettyjen magneettien parametreja [1, s. 31].

Käämi	Sisäsäde a (mm)	Ulkosäde b (mm)	Korkeus $2l$ (mm)	N_{tot}	j_{tot} (m)	Massa m (g)
1	19,8	57,3	65,3	720	155,9	4343
2	19,8	51,5	59,1	720	154,8	3717
3	19,8	51,5	59,1	720	154,8	3739

Käämin 1 geometria poikkeaa kahdesta muusta käämistä, joten sen ominaisuudetkin ovat jonkin verran erilaiset. Myös PET-eriste pienentää koko käämin lämmönjohtavuutta enemmän kuin esimerkiksi ohut lakkaeriste.

Käämeissä on 26 johdinkerrosta ja kerroksissa on keskimäärin 28 kierrosta. Kuvassa 4.6 on periaatteellinen poikkileikkaus magneettien johdinten asettelusta. [1, s. 36]

Kuvassa lämmönjohtavuus on myös jaettu kolmeen eri komponenttiin. Johtimen pituussuuntainen komponentti λ_y on kuvassa johtimien suuntaisesti (ei näy kuvassa).



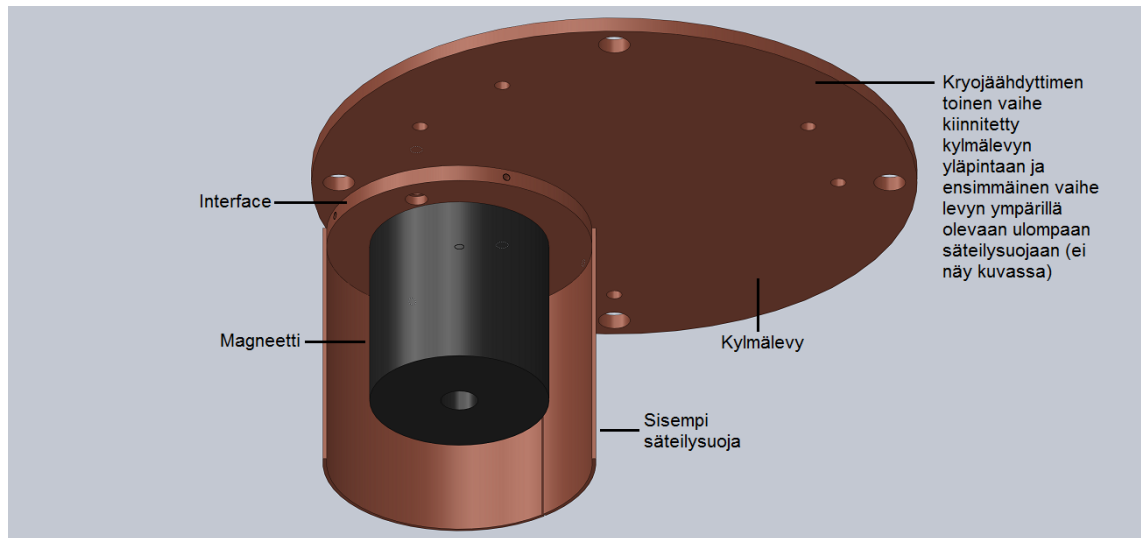
Kuva 4.6 Koemagneetin poikkileikkaus. Kuvassa näkyy johdinten asettelu ja lämmönjohtavuuden eri komponentit. [1, s. 36]

Magneetin säteen suuntaiseksi komponentiksi on merkitty λ_r ja akselin suuntaiseksi λ_z . [1, s. 36]

4.3 Kryogeeninen interface ja koejärjestely

Jotta magneetteja voidaan jäähdyttää kryojäähdyttimellä, tulee ne kytkeä kylmähän ja kiinnittää kryostaattiin. Kiinnitys tulee olla riittävän tukeva, jotta magneetti ei pääse liikkumaan toiminnan aikana. Liikahdukset voivat aiheuttaa lämpöä ja näin ollen pahimmillaan quenchin. Mittauksissa käytetyssä kryostaatissa ja kaksivaiheisessa kryojäähdyttimessä ei ollut valmista liityntäpintaa koemagneeteille, joten se valmistettiin ensimmäisenä. Tavoitteena oli saada mahdollisimman hyvä lämmönjohtavuus kylmähän ja magneetin välille.

Liityntä suoritettiin pyöreäksi sorvatulla kuparilevyllä, joka kiinnitettiin kryostaatin kylmälevyyn, johon kylmähän toinen vaihe on kiinnitetty. Kuparilevyn ja kylmälevyn väliin lisättiin hyvin lämpöä johtavaa tahnaa (Apiezon N-grease) [2]. Magneetti kiinnitettiin kuparilevyyn sen akselin läpi kulkevalla pultilla, jossa oli erillisiä kuparirakenteita pitämässä magneettia paikoillaan. Pultin päähän kiristettiin sokka ja mutteri. Kuvassa 4.7 on kryostaatin sisäosien hahmotelma. Kylmälevyn ympärillä on noin 10 kerrosta supereristettä ja ulompi säteilysuoja, jotka eivät näy kuvassa (nähtävissä kuvassa 4.8). Kryojäähdyttimen ensimmäinen vaihe on kiinnitetty tähän säteilysuojaan.



Kuva 4.7 Kryostaatin sisäosat.

Magneetin ympärille lisättiin vielä ylimääräinen kuparista valmistettu sylinterin muotoinen sisempi säteilysuoja, jonka pohja eristettiin heijastavalla alumiinikalvolla. Mittauksissa magneettiin ei ajettu lainkaan virtaa, joten virtajohtimia ei tarvittu.

Magneetit sijoitettiin kryostaattiin ja niiden jäähditys aloitettiin huoneen lämpötilasta kryojäähdyttimen avulla. Samanaikaisesti kryostaattiin imettiin tyhjiötä esivaakuumpumpulla ja tietyn tyhjiötason jälkeen turbopumpulla. Alhaisissa lämpötiloissa kryostaatissa alkaa tapahtua niin sanottua kryopumppausta, eli kaasumolekyylit alkavat kondensoitumaan kylmille pinnoille ja alipaine kasvaa nopeasti [6]. Koska jäähditys tapahtui mekaanisesti, ei kokeissa tarvittu kryonesteitä.

Kryostaatin jäähdyttämiseen käytettiin kaksivaiheista Cryomechin [15] GB04-Gifford-McMahon-kryojäähdytintä [14]. GB04-jäähdyttimen toisen vaiheen jäähdysteho 11 kelvinissä on noin 4 W ja ilman kuormaa se saavuttaa parhaimmillaan noin 8 K lämpötilan. Kompressorina käytettiin Cryomechin CP640-mallia. Kompressorin on vesijäähdytteinen ja sen ottoteho on noin 5,5 kW [5, s. 28].

Lopullinen tyhjiötaso kryostaatissa oli noin $10^{-5} - 10^{-6}$ Pa, eli niin sanottu hyvä suurtyhjiö [21, 50]. Näin alhaisessa paineessa jäännöskaasun kautta johtuva lämpömäärä ei ole enää kovin merkittävä.

Kun magneetteihin ei ajettu lainkaan virtaa, suurin lämpökuorma syntyi kryostaatin seinien läpi säteilemällä ja tukirakenteita pitkin johtumalla. Koska kryostaatin

ulompi säteily suoja jäähdytti noin 90 K lämpötilaan, suurin lämpökuorma oli sen ja ulkoseinän välillä. Kryostaatin kylmälevy jäähdytti kylmimmillään noin 11 kelviniin, joten sisempi säteily suoja oli suunnilleen tämän lämpöinen. Kuvassa 4.8 on kryostaatin sisäosat ilman ulkokuorta kun yksi koemagneetti on asennettuna interfaceen (sisempi säteily suoja ei vielä asennettuna), ja kryostaatti sekä kryojäähdytys kokonaisuudessaan tyhjiöpumppujen putkien kanssa.



Kuva 4.8 Kryostaatti ilman ulkokuorta ja sen kanssa.

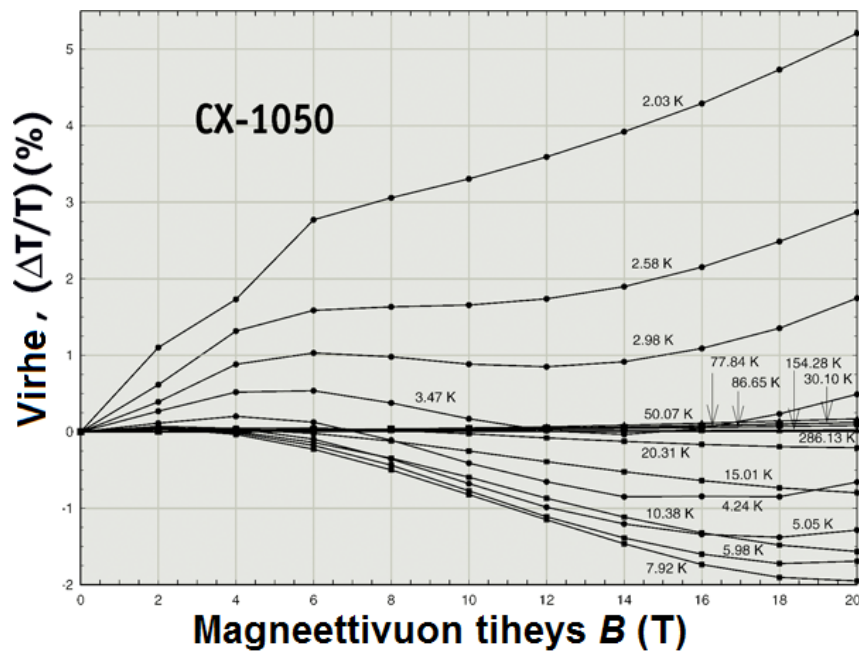
Myös magneetin kiinnityskohdan ja interfacen väliin lisättiin samaa hyvin lämpöä johtavaa Apiezon N-grease rasvaa. Tahnan tarkoituksena oli saada aikaan mahdollisimman hyvä lämpökontakti kahden pinnan välille. Toinen vaihtoehto olisi käyttää indium-kalvoa pintojen välissä, mutta indium on kallista ja tahnulla oletettiin saatavan tarpeeksi tarkkoja tuloksia.

Koska kylmälevy jäähdytti vain noin 11 K:iin ja niobititaanin T_c on noin 9,3 K, ei testeissä saavutettu suprajohtavaa tilaa. Tämä ei kuitenkaan ollut edes tavoitteena, koska lämmönjohtavuuden suuruusluokka pystyttiin selvittämään ilman magneetteihin syötettävää virtaa.

4.4 Käämien anturit ja lämmitin

Kokeissa mitattiin magneettien lämpötiloja niiden lämmönjohtavuuksien määrittämiseksi. Mittauksia varten käämeihin lisättiin lämmitin, joka asetettiin käämissä johdinosan puoliväliin. Lämmitin koostui kuparijohtimesta, joka kiersi koko käämin johdinkierroksen mukaisesti. Tämän takia lämmittimen paikka käämin korkeussuunnassa vaihtui noin 1 mm:llä koko kierroksen aikana. Lämmittimessä oli myös virtajohtimet tehon säätöä varten ja sen ohjaus tapahtui ITC-virtalähteellä. Käämiä oli mahdollista lämmittää joko jatkuvalla teholla tai lyhyinä pulsseina.

Lämpötilamittauksia varten käämeihin kiinnitettiin neljä Cernox-anturia [36]. Muuttuvat magneettikentät tai niiden suunta eivät aiheuta juurikaan virhettä Cernox-antureissa ja ne toimivat lämpötiloissa 0,1–420 K. Kuvassa 4.9 on Cernox CX-1050-anturin mittaaman lämpötilan virhe ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta lämpötiloissa 2,03–286 K [37, 8].



Kuva 4.9 Tyypillinen mitatun lämpötilan virhe CX-1050 sensorille ulkoisessa magneettikentässä toimittaessa lämpötiloissa 2,03–286 K [37, 8].

Cernox-antureilla mittaus perustuu lämpötilan mukana muuttuvaan resistanssiin, joka voidaan taas muuntaa lämpötilaksi jokaisen anturin yksilöllisen resistanssikuvaajan sekä kalibroinnin avulla. Kalibrointi tapahtuu asettamalla kutakin mitattua anturin resistanssia vastaava kuvaajasta saatu lämpötila ITC-laitteeseen. An-

tureiden resistanssi kasvaa suuremmaksi alhaisissa lämpötiloissa, joten myös niiden tarkkuus paranee [38]. Anturit kalibroitiin kahteen lämpötilaan (matala ja korkea). Korkeissa lämpötiloissa sama resistanssin muutos tarkoittaa suurempaa lämpötilan muutosta kuin alhaisissa lämpötiloissa, joten ylemmän lämpötilan kalibrointi on ongelmallisempaa. Koska resistanssi muuttuu logaritmisesti, voi väärä kalibrointi tai huonosti valitut kalibrointilämpötilat aiheuttaa virhettä.

Antureiden resistanssia mitattiin kahdella ITC-mittarilla, joissa oli kussakin kolme kanavaa. Laitteet muuttivat mitatun resistanssin lämpötilaksi annettujen kalibrointiarvojen avulla. Tämän jälkeen lämpötilatieto siirrettiin tietokoneelle mittaushjelmaan, jolla voitiin tallentaa antureiden lämpötilan muutos mittaussjakson aikana.

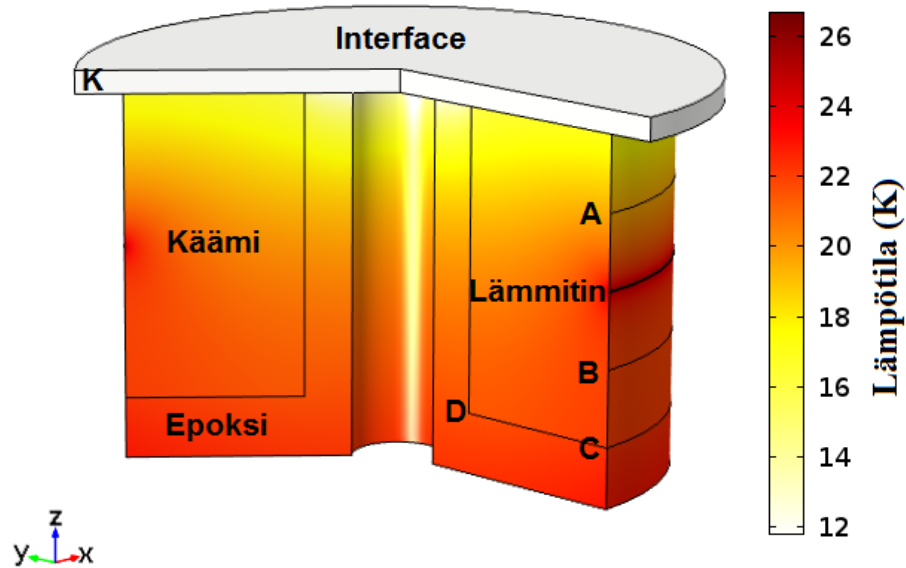
Kryostaatin säteilysuojaan ja kylmälevyyn oli myös kiinnitettynä niin sanotut termoparianturit. Kyseiset anturit eivät ole aivan yhtä tarkkoja kuin Cernoxit. Käämin 2 mittauksista lähtien myös kylmälevyn ja magneetin väliseen interfaceen asetettiin Cernox-anturi, jotta alhainen lämpötila saatiin mitattua tarkemmin ja varmistuttiin että termoparin näyttämät lämpötilat olivat riittävän tarkkoja.

Mittausanturit kiinnitettiin magneetin johdinosaan siten, että kontakti kupariin oli mahdollisimman hyvä ja mitatut arvot vastaisivat johdinalueen lämpötiloja. Kaksi antureista sijaitsi käämin ulkopinnalla lämmittimen ylä- ja alapuolella samalla etäisyydellä. Kaksi muuta anturia olivat magneetin ”pohjassa” epoksin sisällä (kiinni käämin kuparissa), eli vastakkaisella puolella kryojäähdyttimen kylmäpään nähden. Toinen antureista oli käämin ulkoreunan puolella ja toinen keskiakselin puolella. Kuvassa 4.10 on hahmotettu antureiden ja lämmittimen sijaintia koekäämmeissä.

Anturit on nimetty siten, että lähimpänä kylmälevyä olevaa merkitään A:lla, lämmittimen alapuolella olevaa B:llä, magneetin ulkosäteellä olevaa C:llä ja sisäsäteellä olevaa D:llä. Kylmälevyssä ja interfacessa olevia antureita merkitään taas K:lla (kryojäähdyttimen kylmäpään lämpötila), koska niiden mittaamat lämpötilat olivat hyvin samansuuruisia.

4.5 Mittaukset

Magneeteille suoritettiin useita erilaisia mittauksia. Kaikille magneeteille mitattiin jäähtymisaika kryojäähdyttimen käynnistämisestä (magneetin ollessa huoneen lämpötilassa), lämpötilan tasaantumiseen alimpaan lämpötilaansa, jonka jälkeen lämpötilaerot eri mittareiden välillä kirjattiin ylös.



Kuva 4.10 Antureiden (A, B, C, D ja K) ja lämmittimen sijoittelu koemagneetissa.

Jokaiselle käämille mitattiin myös askelvaste, eli lämmittimeen ajettiin 100 mW vaikeus ja mitattiin kuinka kauan lämpötilojen tasaantumiseen kuluu aikaa. Askelvasteesta voidaan laskea aikavakio $\tau_a = 1 - e^{-1} \approx 63,2\%$, eli se aika, jossa vaste saavuttaa 63,2 % maksimiarvostaan. Aikavakiosta voidaan päätellä kuinka nopeasti systeemi reagoi siinä tapahtuviin muutoksiin. [19]

Tämän jälkeen lämmittimelle syötettiin eri suuruisia tehoja ja jälleen odotettiin lämpötilojen tasaantumista kaikissa mittaustantureissa, eli mitattiin niin sanottuja stationäärisiä tilanteita. Kun lämpötilat olivat tasaantuneet, antureiden lukemat kirjattiin ylös. Tehoa nostettiin siten, että anturin B näyttämä lämpötila nousi aina noin 2 K. Mittaukset lopetettiin kun käämin lämpötila oli noin 35 K tai syötetty teho nousi lähelle 5000 mW:a (jotta lämmitin ei hajoaisi).

Stationäärisissä mittauksissa hyödynnettiin ITC-laitteen PI-säädintä asettamalla tietty tavoitelämpötila, jonka jälkeen säädin vaihteli lämmittimen tehoa kunnes lämpötila oli tasaantunut haluttuun arvoon. PI-säätimen kalibroinnissa hyödynnettiin jokaiselle käämille mitattua aikavakiota. Kun lämpötilat olivat tasaantuneet, lämmittimen teho laskettiin kaavalla $P = UI$ käyttämällä yleismittareita käämejä kiertävän johtimen jännitteen ja virran mittaamiseen.

Viimeiseksi lämmittimeen syötettiin lyhyitä tehopulsseja, joiden vaikutus magnee-

tin eri lämpötila-antureihin kirjattiin ylös. Tehopulssimittauksissa lämmittimen tehoa säädeltiin ITC:n avulla asettamalla lämmittimen jännitteelle yläraja ja tämän jälkeen säätämällä mittausohjelmalla jännitettä prosentteina tästä maksimijännitteestä. Tehopulssien syöttö tehtiin mittausohjelman, ITC:n ja sekunttikellon avulla. Mittaus suoritettiin asettamalla tietyn suuruinen jänniteprosentti mittausohjelmaan, joka vastasi esimerkiksi 0,5 W tehoa, ja pitämällä teho vakiona 10 sekunnin ajan. Tämän jälkeen lämmitin sammutettiin. Mittauksien välissä odotettiin että magneetin lämpötila tasaantuu.

Käämeille suoritettiin kaksi erillistä mittaussarjaa. Ensimmäisessä sarjassa käämit olivat luvun 4.2 mukaiset. Toisessa sarjassa käämeistä poistettiin käämin kylmälevyn puoleisessa päässä oleva epoksikerros (tilanne nähtävissä kuvassa 4.10). Ensimmäisessä sarjassa puristusvoima, jolla magneetti kiinnitettiin kylmälevyyn ei ollut kovin suuri, kun taas toisessa sarjassa mutteri jolla puristus saatiin aikaiseksi kiristettiin 5 N voimalla.

Epoksikerroksen poisto yksinkertaisti tilanteen mallintamista sekä tulosten vertailua, koska se poisti joitakin muuttujia (epoksin yli oleva lämpötilagradientti ja eri lämpötilaresistanssit osien välillä). Tiukempi kiinnitys taas oletettavasti pienensi lämpöresistanssia magneetin ja kylmälevyn välillä.

4.6 Testattavien käämien lämpöverkkomallit

Suprajohtavan magneetin jäähtymisen kannalta merkittäviä ominaisuuksia ovat ainakin efektiivinen lämmönjohtavuus λ_{eff} eri suunnissa, ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa c_p sekä magneetin eri materiaalien tiheys ρ . Näiden ominaisuuksien suhdetta kutsutaan myös termiseksi diffusiviteetiksi [m^2/s]

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}, \quad (4.1)$$

joka kuvaa aineen kykyä johtaa lämpöä suhteutettuna sen kykyyn varastoida energiaa. Suurempi α tarkoittaa nopeampaa reagointia ympäristössä tapahtuviin muutoksiin, eli muutoksen jälkeinen tasapainotila saavutetaan nopeammin. Nopea reagointi ympäristön muutoksiin vaikuttaa esimerkiksi siihen, kuinka nopeasti quenchin aikainen normaali alue leviää magneetissa, millä voi olla merkittävä vaikutus magneetin suojaukseen. Toisaalta c_p ja ρ eivät juurikaan vaikuta tasapainotilassa olevan systeemin lämpötilaan; jäähdytettäessä esimerkiksi suprajohtavaa magneettia

vakioteholla, vaikuttaa tiheys ja ominaislämpökapasiteetti pääosin vain magneetin jäähtymisaikaan. [46, 52]

Lämmönjohtavuudesta taas riippuu pääsääntöisesti se, kuinka alhaiseen lämpötilaan magneetti jäähtyy ja kuinka suuri vaikutus eri suuruisilla lämpökuormilla on magneetin tasapainotilan lämpötilaan sekä eri osien lämpötilaeroihin. Eri suuntaisiin efektiivisiin lämmönjohtavuuksiin vaikuttaa materiaalien lämmönjohtavuuksien lisäksi esimerkiksi aineiden suhteellinen osuus, eri materiaalien ja osien terminen kontakti sekä koko magneetin ja sen osien rakenne. [25]

4.6.1 Mallinnusohjelma ja käytetyt yhtälöt

Käämien lämmönjohtavuutta voidaan arvioida mittauksista saaduista tuloksista muodostamalla magneeteista ohjelmallinen malli. Tässä työssä mallin muodostamiseen käytettiin Comsol Multiphysics ohjelmaa [9]. Malli tehtiin aksiaalisymmetrisenä, eli mitattavasta magneetista mallinnettiin vain toisen puolen 2-ulotteinen poikkileikkaus. Mallinnus suoritettiin karteesisessä koordinaatistossa 2-ulotteisena stationäärisenä kiinteiden aineiden johtumisongelmana, eli lämpötila ei muuttunut ajan suhteen. Mittaustuloksista hyödynnettiin tilanteita joissa magneetin lämpötila oli tasaantunut. Mallinnettavia magneetteja oli kolme, joista yhden dimensiot olivat erilaiset kuin kahden muun. Magneettien mitat oli nähtävissä taulukossa 4.1.

Fourierin laki liittää paikallisesti yhteen lämpövirrantiheyden ja lämpötilagradientin yhtälön

$$q = -\lambda(T)\nabla T \quad (4.2)$$

mukaisesti, missä q on lämpövirrantiheys ja λ lämmönjohtavuus. Yhtälöstä 4.2 johdettamalla eri suuntaiset efektiiviset lämmönjohtavuudet voidaan määrittää makroskooppisessa kappaleessa kaavalla

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{l}{A\Delta T} \int_A q \, da, \quad (4.3)$$

missä ΔT kappaleen päiden välinen lämpötilaero, l kappaleen pituus ja A poikkileikkauksen pinta-ala. Saatua lämmönjohtavuus on lämpötilagradientin ΔT suuntainen, joten yhtälöllä on mahdollista laskea efektiiviset lämmönjohtavuudet eri suunnissa. [40]

Comsol Multiphysics käyttää kiinteiden aineiden lämpötilan mallinnusyhtälönä dif-

ferentiaalimuotoista Fourierin lakia

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) = Q_{\text{source}}, \quad (4.4)$$

missä \mathbf{u} on niin sanottu *nopeuskenttä*, joka liittyy mallinnettavan kappaleen tai aineiden mahdolliseen liikkeeseen, ja Q_{source} mallin sisältämät erilliset lämpölähteet, joita voi olla useampia. Koska mallinnus suoritettiin stationäärisenä ongelmana, eikä mallinnusalueella ollut liikettä, häviää yhtälön ajasta riippuva ensimmäinen termi sekä nopeuskentästä riippuva toinen termi. [9]

4.6.2 Mallien rakenne

Jos magneetin eri materiaalien lämmönjohtavuudet ja tilavuusosuudet tunnetaan jonkinlaisella tarkkuudella, voidaan efektiiviselle lämmönjohtavuudelle määrittää ylä- ja alaraja mallintamalla lämpövastuksia sähköpiirin tapaan [39]. Koska lämmönjohtavuus on kuparissa suurempi kuin magneetin impregnoinnissa käytetyssä epoksissa, saadaan lämmönjohtavuuden maksimi suprajohtavassa magneetissa johtimien kulkusuunnassa. Lämmönjohtavuuden minimi taas saavutetaan sylinterin muotoisen magneetin säteen suunnassa. [40]

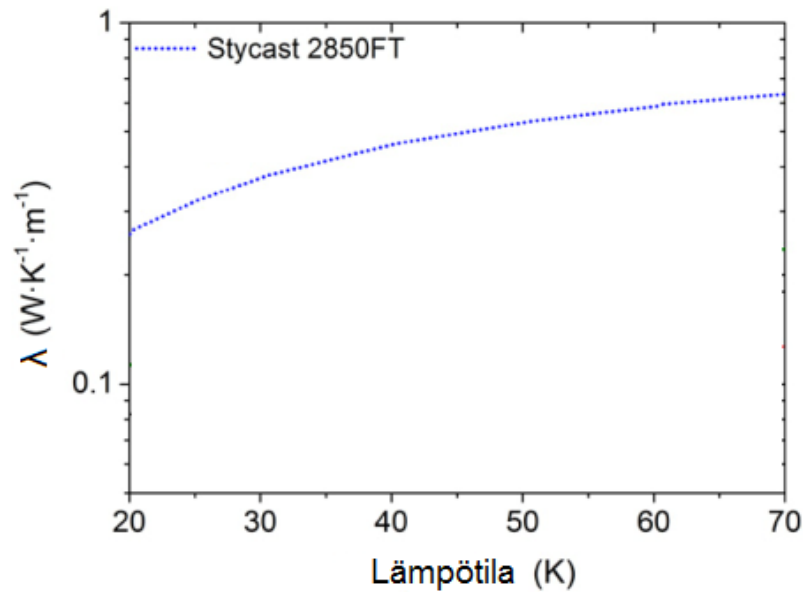
Mallinnuksessa magneetin eri osien termistä kontaktia approksimoitiin eri suuruisten lämpöresistanssien avulla. Todellista tilannetta ei kuitenkaan tunnettu, joten käytetyt arvot olivat vain arvioita siten, että mallin tulokset vastaisivat mittaustuloksia. Magneetissa 2 pystysuuntaisen lämmönjohtavuuden arvo määräytyi pääosin eri johtimien välillä olevasta lämpöresistanssista. Suurin magneetti (1) sisältää sukkamaisista PET-eristettä, jonka vaikutus lämmönjohtavuuteen oli oletettavasti merkittävä pysty- ja vaakasuunnassa. Käämin 3 lakkaeristeen oletettiin myös vaikuttavan lämmönjohtavuuteen kummassakin mallinnetussa suunnassa. Lämmitin mallinnettiin magneetin ulkokehää kiertävänä neliön muotoisena lämmönlähteenä, jonka kontakti magneetin kanssa oletettiin ideaaliseksi ja ulkoreuna eristetyksi, jolloin kaikki syntynyt lämpö siirtyi magneetin kautta kylmälevyyn.

Jotta mallinnus oli mahdollista, tarvittiin testimagneettien materiaalien lämmönjohtavuus λ , ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa c_p ja tiheys ρ . Magneetit koostuvat pääosin kuparista, Stycast 2850FT-epoksista ja niobititaanista. Koska niobititaanin alfa-arvo käytetyissä WIC-johtimissa on noin 29 (NbTi:n osuus johtimessa noin 3,45 %), sen merkitys magneetin lämmönjohtavuuteen ja ominaislämpökapasi-

teettiin on hyvin pieni. Tästä johtuen NbTi jätettiin huomioimatta mallinnuksessa.

Aineiden lämmönjohtavuus

Kuvassa 4.11 on lähteessä [58] pienistä Stycast 2850FT-epoksitangoista mitattu lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona. Kuten nähdään lämmönjohtavuus ei ole vakio kaikissa lämpötiloissa ja epoksin tapauksessa se pienenee lämpötilan laskiessa välillä 70 K ja 20 K. Mallissa käytettiin kuvassa nähtäviä arvoja epoksin lämmönjohtavuutena.



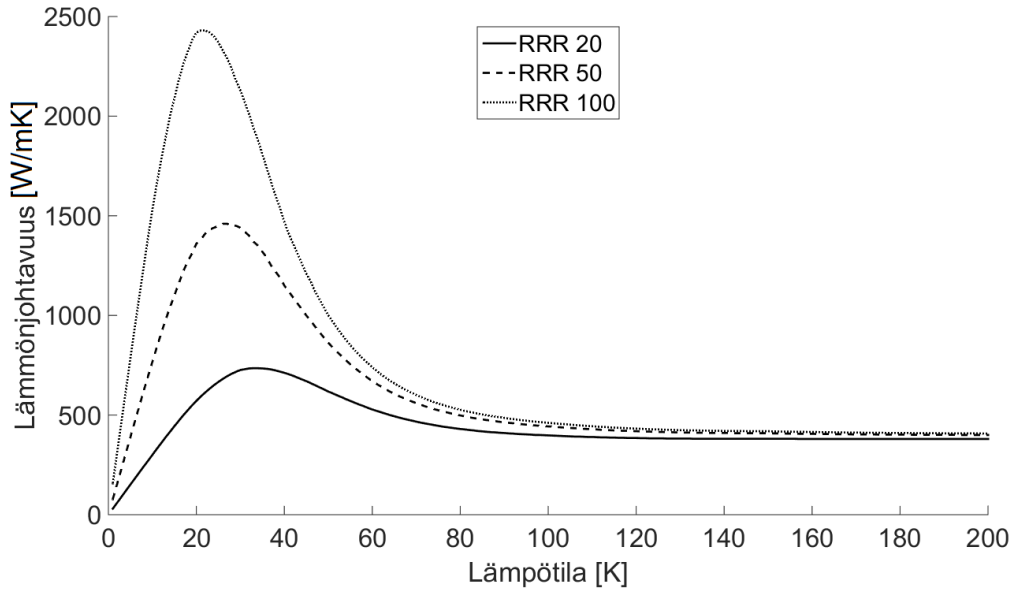
Kuva 4.11 Pienistä tangoista mitattu lämmönjohtavuus Stycast 2850FT-epoksille [58].

Kuvassa 4.12 on kuparin lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona RRR -arvoilla (Residual Resistivity Ratio) 20, 50 ja 100 [1, 18]. Mallinnuksessa käytettiin kuparin lämmönjohtavuutta RRR -arvolla 100.

RRR -arvolla, eli kuparin puhtaudella on myös suuri merkitys lämmönjohtavuuteen, mitä voidaan havainnollistaa *Wiedemann-Franzin lailla*

$$\lambda(T)\rho_r(T) = L_{\text{lorenz}}T, \quad (4.5)$$

joka kuvaa aineen lämmönjohtavuuden ja resistiivisyyden vaikutusta toisiinsa [61,



Kuva 4.12 Kuparin lämmönjohtavuus eri RRR-arvoilla [1, 18].

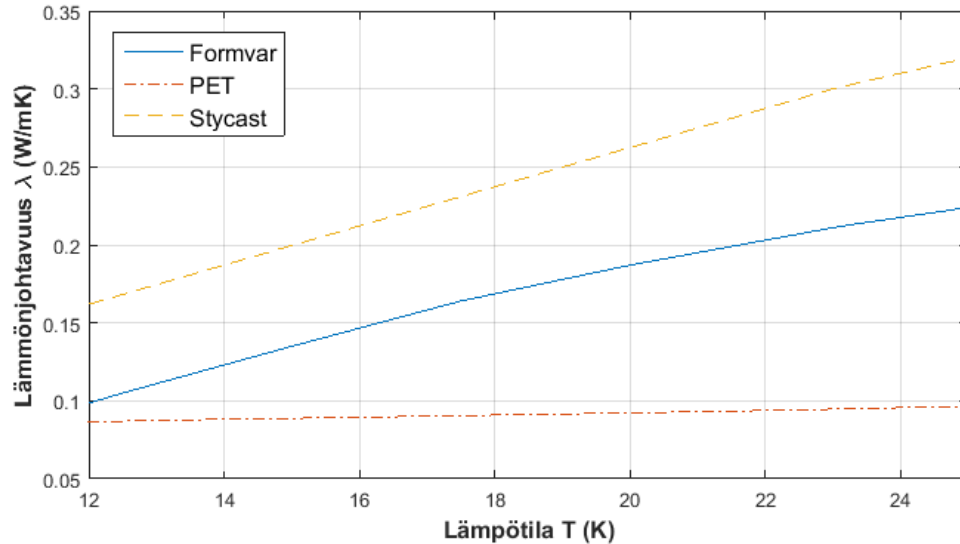
s. 30]. Yhtälössä $L_{\text{lorenz}} = 2,44 * 10^{-8} W \Omega K^{-2}$ on niin sanottu *Lorenzin luku*. Tämä lämmönjohtavuuden ja resistiivisyyden yhteys johtuu pääosin elektronien kyvystä siirtää sähköä lisäksi lämpöä; kun aineessa on paljon vapaita elektroneja, sen sähköjohtavuus σ_s on hyvä (eli resistiivisyys on pieni), ja tällöin myös lämmönjohtavuus on hyvä. Tämä on myös nähtävissä yhtälöstä 4.5, eli kun T on vakio ja esimerkiksi lämmönjohtavuus kasvaa, tulee resistiivisyyden pienentyä.

Kuvasta 4.12 nähdään, että kuparin lämmönjohtavuus saavuttaa maksimiarvonsa tietyssä lämpötilassa, jonka jälkeen se alkaa taas tasaantua kohti vakioarvoa. Tämä johtuu siitä että lämpökapasiteetti C kasvaa nopeasti alhaisissa lämpötiloissa lämpötilan funktiona, jolloin myös lämmönjohtavuus kasvaa. Korkeammissa lämpötiloissa materiaalin kiderakenteen värähtelyn nopeus kasvaa nopeammin kuin C (kiderakenteen sisäisten törmäysten määrä lisääntyy), jolloin λ :n arvo alkaa pienentyä. Myös elektronit siirtävät lämpöä aineen sisällä, joten metalleissa johtavuuselektronien vaikutus lämmönjohtavuuteen on merkittävä, koska hyvässä sähköjohteessa on paljon vapaita elektroneja. [45, ss. 63–64]

Mallinnuksessa PET-eristeen lämmönjohtavuudelle käytettiin alkuoletuksena amorfisen ja puolikiteisen aineen lämmönjohtavuutta [18]. Koska eristeen rakenteesta ei ollut varmaa tietoa, arvioitiin kyseistä lämmönjohtavuutta myös mallin tuottamien

tuloksien avulla, jotta mallinnetun käämin lämpötilat vastasivat mittaustuloksia. Myöskään Lakkaeristeen (formvar) tarkasta tyyppistä ei ollut tietoa, joten sen lämmönjohtavuutta ei tunnettu. Alkuarvona käytettiin kirjallisuudesta löytynyttä arvoa yhden tyyppiselle lakalle [18], jota myös sovitettiin mallin tuloksien avulla.

Kuvassa 4.13 on nähtävissä mallinnuksessa käytetyt lämmönjohtavuudet formvar-lakalle, PET-eristeelle ja Stycast-epoksille.



Kuva 4.13 Työssä käytettyjä lämmönjohtavuuksien arvoja [18].

Kuva on piirretty lämpötilavälille 12-25 K. Tämä johtuu mittauksissa saavutetuista lämpötiloista, eli lämmönjohtavuudet on piirretty vain mitatuissa lämpötiloissa.

Yksikkökopit ja anisotrooppisuus

Mallinnuksessa käytetyt arvot ovat siis riippuvaisia lämpötilasta (erityisesti λ ja c_p), joten niille ei voitu käyttää vain yhtä vakioarvoa. Tarvittavat arvot saatiin mallintamalla jokaiselle magneetille erilainen yksikkökoppi, eli yhden WIC-johtimen ja sitä ympäröivien eriste- ja epoksikerroksien 2-ulotteinen poikkileikkaus. Yksikkökopeista voitiin laskea lämmönjohtavuudet käämien r- ja z-suunnissa, eli säteen suuntaisesti $\lambda_{\text{ref},r}$ ja pysty akselin suuntaisesti $\lambda_{\text{ref},z}$.

Magneettien sisältämien materiaalien lämmönjohtavuuksia arvioitiin kirjallisuudesta saatujen arvojen avulla ja niissä huomioitiin eri aineiden välillä olevat lämpöresistanssit. Eristeiden paksuudet ja epoksikerroksen suuruus käämikerrosten välissä ei ollut tarkalleen tiedossa, joten niitä arvioitiin siten, että mallinnuksesta saatiin mahdollisimman hyvin mittaustuloksia vastaavia tuloksia. Nämä arvot pyrittiin kuitenkin pitämään lähellä aikaisemmin esitettyjä arvioita eristekerroksien paksuuksista [1].

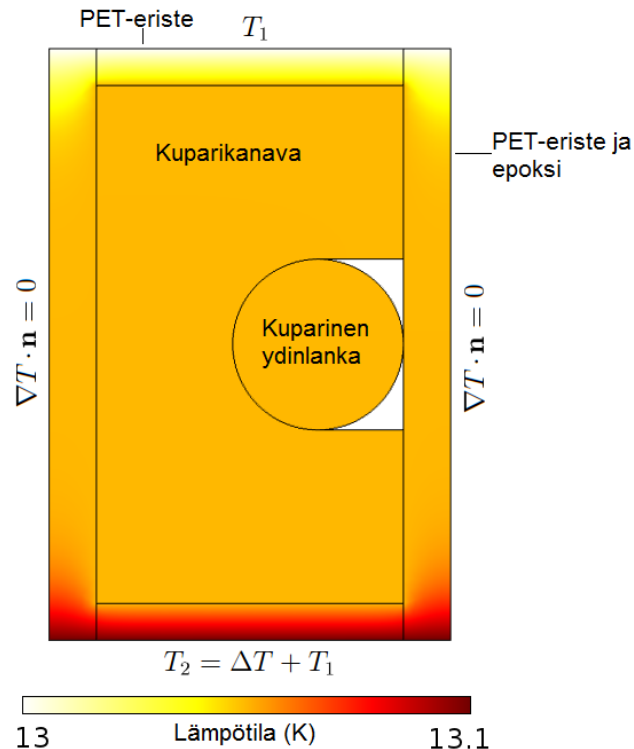
Käämissä 1 yksikkökoppiin mallinnettiin johdin ja sitä ympäröivä PET-eriste. WIC-johdin mallinnettiin kuparista koostuvana kanavana ja ydinlankana (niobitiaani jätettiin huomioimatta, koska sen osuus johtimesta on pieni). Johtimien mittoina kaikissa yksikkökopeissa käytettiin luvussa 4.2 esitettyjä arvoja. Johdinta ympäröi PET-eriste ja käämikerrosten väliin lisätty Stycast 2850FT-epoksi. Epoksi imeytyi PET-sukkaan valmistuksen aikana, joten johdinkerrosten välinen alue mallinnettiin näiden kahden aineen sarjaankytkentänä, eli lämmönjohtavuudet laskettiin yhteen käyttämällä niiden arvioitua kokonaistilavuutta koko alueesta. Johdinkerrosten välissä oletettiin olevan vain PET-eristettä. PET-eristeen paksuutena käytettiin esitettyä arviota $140 \mu\text{m}$. Epoksin sekä eristeen sarjaankytkennän paksuutena taas käytettiin arvoa $180 \mu\text{m}$, koska lisätyn epoksin oletettiin kasvattavan johdinkerrosten etäisyyttä. Epoksin osuutena sarjaankytkennässä käytettiin arviota 10 %, koska sen määrästä ei ollut varmaa tietoa.

Käämissä 2, eli eristämättömässä tapauksessa yksikkökoppi koostui edellisen tilanteen tapaan WIC-johtimen poikkileikkauksen mukaisena kanavana ja siinä kulkevana ydinlankana. Johdinkerrosten välissä oleva epoksikerros mallinnettiin $35 \mu\text{m}$ paksuisena. Johdinkerrosten välinen kontaktiresistanssi ja mahdollisesti kääminnässä jääneet ilmvälit mallinnettiin myös ohuena epoksikerroksena, jonka paksuutena käytettiin arvoa $28 \mu\text{m}$.

Lakkaeristetyn käämin (3) yksikkökoppi oli WIC-johtimen osalta vastaavanlainen kuin edellä. Johdinta ympäröivä lakkaeristys mallinnettiin ohuena kerroksena ja johdinkerrosten väliin mallinnettiin lisäksi $35 \mu\text{m}$ paksuinen epoksikerros. Lakkaeristeen paksuutena mallinnuksessa käytettiin $25 \mu\text{m}$ johdinkerrosten välissä ja $5,0 \mu\text{m}$ johdinkerrosten välissä. Lakkaeristeen mallinnettu paksuus oli pienempi kuin epoksin paksuus eristämättömässä tapauksessa, koska lakan lämmönjohtavuus arvioitiin pienemmäksi ja kyseisillä paksuuksilla mallinnustulokset vastasivat mittaustuloksia tietyllä tarkkuudella. Johdinkerrosten välinen mallinnettu lakkaeristeen paksuus on

ohuempi johtuen havaitusta lakan epätasaisesta rakenteesta (esitetty luvussa 4.2), eli epoksin oletettiin täyttäneen lakkapinnassa olevat tyhjät alueet.

Reunaehtoina yksikkökopeissa kahdella vastakkaisella sivulla käytettiin vakiolämpötiloja (T_1 ja T_2) ja kahdella muulla lämpöeristystä $\nabla T \cdot \mathbf{n} = 0$, eli niiden yli lämpötilagradientti (ja näin ollen lämpövirta) oli 0. Lämpötilagradientiksi ΔT vakiolämpötilojen väliin valittiin 0,1 K, ja tilanne mallinnettiin lämpötiloissa 5–40 K, 1 kelvinin välein. Tämän jälkeen laskettiin lämpövirran suuruus vakiolämpöisen reunan yli, josta laskettiin kaavalla 4.3 efektiivinen lämmönjohtavuus. Laskenta tehtiin kahdesta eri suunnasta, jolloin saatiin yksikkökopin lämmönjohtavuus r- ja z-suunnassa. Yksikkökopit valittiin symmetrisesti siten, että saadut arvot voitiin yleistää koskemaan koko käämialuetta. Myös ominaislämpökapasiteetti ja tiheys laskettiin samasta mallista käyttämällä eri materiaalien arvioituja osuuksia koko magneetissa. Kuvassa 4.14 on käämin 1 mallinnuksessa käytetty yksikkökoppi.



Kuva 4.14 Poikittaisen ja pitkittäisen lämmönjohtavuuden laskennassa käytetty yksikkökoppi. Kahdella reunalla vakiolämpötila ja kahden muun reunan yli lämpövirta = 0.

Työssä käytetyt yksikkökopit eivät luultavasti ole täysin todellista tilannetta vastaavia, koska eri materiaalien määrät johtimien väleissä jouduttiin arvioimaan. Toi-

saalta myös lakan ja PET-eristeen lämmönjohtavuuksia on sovitettu mitta- ja mallinnustulosten avulla, joten niissä on huomioitu esimerkiksi lämpöresistanssia johtimen ja eristeen välillä. Toisin sanoen kyseiset arvot eivät luultavasti vastaa aineiden todellisia lämmönjohtavuuksia, vaan enemmänkin eristeen ja vierekkäisten materiaalien kontaktiresistanssien sarjaankytkennän efektiivistä lämmönjohtavuutta.

Magneettien säteen ja pysty akselin suuntaiset lämmönjohtavuudet mallinnettiin erikseen käämialueen anisotrooppisuuden takia. Käämit ovat anisotrooppisia koska niiden sisäinen rakenne on erilainen eri suunnista tarkasteltuna. Tätä rakenteen anisotrooppisuuden suuruutta voidaan päätellä erisuuntaisten lämmönjohtavuuksien suhteesta.

Mitä kauempana kaavalla

$$\frac{\lambda_{\text{ref},z}}{\lambda_{\text{ref},r}}, \quad (4.6)$$

lasketettu suhde on arvosta 1, sitä anisotrooppisempi kappale on kyseessä. Tässä työssä mallinnetussa tapauksessa z-suuntainen lämmönjohtavuus oli suurempi, joten suurempi arvo kaavalla tarkoittaa anisotrooppisempaa tapausta.

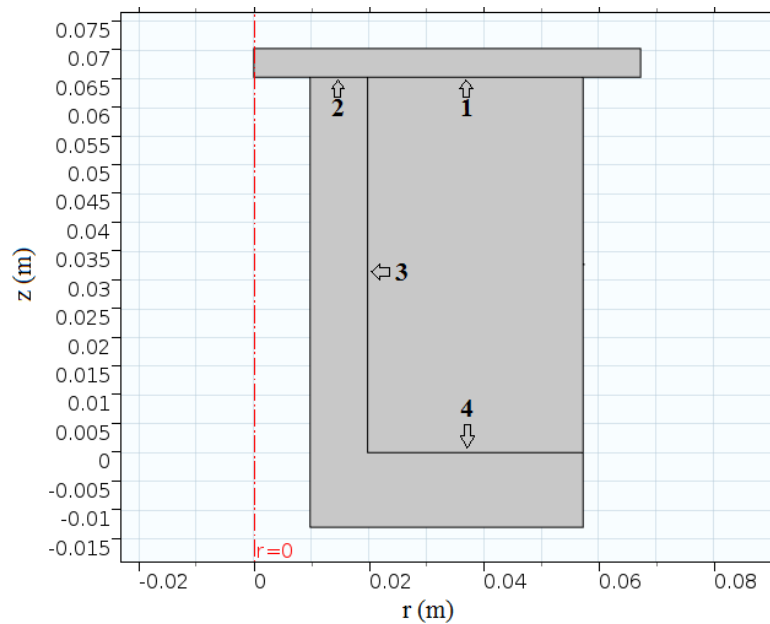
Koko magneetin malli

Yksikkökopeista saadut lämmönjohtavuudet, tiheys ja ominaislämpökapasiteetti siirrettiin toiseen, koko magneetin rakenteen käsittävään malliin, jolla simuloitiin mittauksien mukaisia tilanteita. Anisotropia huomioitiin käyttämällä mallin käämialueen lämmönjohtavuutena yhtälössä 4.4 tensoria (λ_{xx} , λ_{yy} ja λ_{zz}), johon $\lambda_{\text{ref},r}$ ja $\lambda_{\text{ref},z}$ asetettiin. Koska kyseessä oli 2-ulotteinen mallinnus, λ_{yy} :n arvo oli 0.

Magneetin jäähdytyslevyissä kiinni olevaan päähän asetettiin vakio lämpötila, jona käytettiin mittauksista saatua kylmälevyn lämpötilaa kullakin lämmitysteholla. Muille magneetin reunoille asetettiin reunaehdoksi joko lämpöeristys tai sisään tuleva (tai magneetista pois säteilevä) lämpövirta. Tällä lämpövirralla mallinnettiin käämiin kryostaatin ulkopuolelta tulevaa lämpösäteilyä. Toisaalta magneetti oli todennäköisesti lämmittimen kohdalta lämpimämpi kuin kuparinen sisempi säteilysuoja, joten sen ympärille asetettiin käämistä poistuva lämpövirta, jonka suuruudeksi valittiin 40 mW. Magneettiin kohdistuvan lämpökuorman kokonaissuuruudeksi asetettiin 240 mW, joten magneetista kylmälevyyn siirtyvä lämpöteho oli 200 mW kun

lämmitin ei ollut päällä.

Lämmitin mallinnettiin magneetin keskellä kiertävänä neliön muotoisena johtimena, joka asetettiin kaavan 4.4 mukaiseksi lämpölähteeksi Q_{source} . Käämien mallit tehtiin tilanteelle jossa epoksikerros oli poistettu magneetin päältä, koska tämä yksinkertaisti tilannetta. Kuvassa 4.15 on PET-eristetyin magneetin mallinnettu aksiaalisymmetrinen osa ja kuvassa 4.16 on yksi tästä saatu lämpötilajakauma.

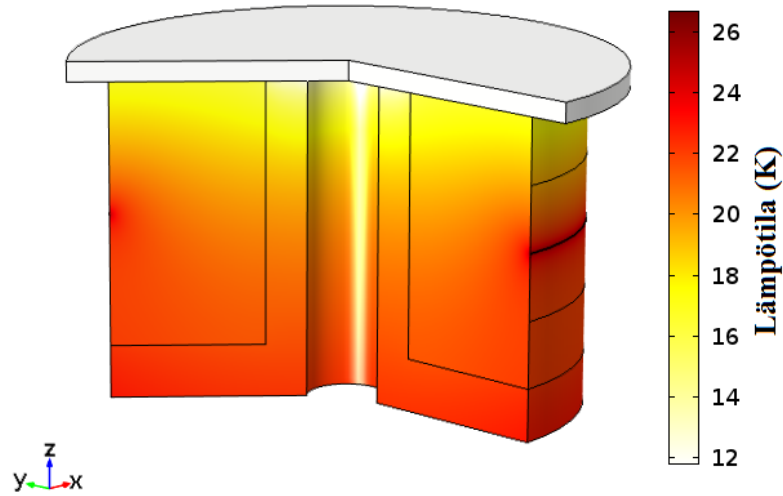


Kuva 4.15 PET-eristetyin magneetin aksiaalisymmetrinen mallinnusalue ja eri lämpöresistanssien paikat.

Mallissa on mukana vain kryostaatin interface (ei kylmälevy), jonka yläpinta on asetettu vakio­lämpötilaan. Interfacen mitattu lämpötila oli lähes sama kuin kylmälevyn, joten kyseinen malli oletettiin riittävän tarkaksi.

Magneettien eri osien välille oletettiin lämpökontakteja, joihin asetettiin lämpöresistansseja. Jokaisessa käämissä oli neljä eri kohtaa joihin kyseiset resistanssit asetettiin ja ne on numeroitu kuvassa 4.15. COMSOL-ohjelmassa eri alueiden väliset lämpökontaktit asetetaan rajoittavan alueen johtavuutena, jolloin yksikkönä on $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ja suurempi arvo tarkoittaa pienempää resistanssia. Taulukossa 4.2 on käytetyt johtavuudet mallinnetuille käämeille.

Kuten nähdään, mallinnuksessa käytetyssä johtavuudessa 1 oli suuria eroja käämien



Kuva 4.16 PET-eristetyin magneetin yksi mallinnettu lämpötilajakauma.

Taulukko 4.2 Mallinnuksessa käytetyt johtavuudet.

Käämi	Johtavuudet ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)			
	1	2	3	4
1	31,9	10	50	80
2	525	10	50	80
3	135,2	10	50	80

välillä. Tämä johtui siitä, että kyseinen arvo vaikutti merkittävästi lämpötilaan johon magneetti lämpeni lämmityksen seurauksena, kun taas käämin lämmönjohtavuus vaikutti merkittävämmiin eri antureiden lämpötilaeroihin. Toisin sanoen kyseisellä lämpöresistanssilla (tai johtavuudella) säädettiin magneetin lämpötila vastaamaan mittauksissa lämmityksen seurauksena saavutettuja lämpötiloja, ja samanaikaisesti käämien lämmönjohtavuudella eri antureiden lämpötilaerot haettiin mahdollisimman lähelle mittaustuloksia. Jos mallin lämpötilat oltaisiin määrätty vain lämmönjohtavuudella, olisi antureiden lämpötilaerot kasvaneet merkittävästi suuremmiksi kuin mittauksissa.

Käytettyjä erisuuruisia lämpöresistansseja voidaan perustella myös sillä, että poistettaessa käämien ”päällä” olevaa epoksikerrosta ne eivät lähteneet irti täysin samankaltaisesti kaikissa tapauksissa ja kupariosan pintaan jäi aina jonkin paksuinen

kerros epoksia. Toisin sanoen esimerkiksi käämissä 1 saattoi olla jäljellä paksumpi kerros epoksia kuin kahdessa muussa magneetissa, jolloin myös lämpöresistanssi kupariosien ja interfacen välissä olisi suurempi. Yksi vaihtoehto pyrkiä tasapainottamaan käämien lämpötiloja olisi ollut muuttaa säteilynä tulevaa lämpökuormaa, mutta koska se oletettiin kaikissa tapauksissa lähes yhtäsuureksi (mittaukset suoritettiin samalla kryostaatilla ja mahdollisimman samankaltaisesti), ei sillä voitu tasapainottaa kaikkia magneetteja samanaikaisesti.

Lämmönjohtavuudet ja niiden suhde

Arviota lämmönjohtavuudelle haettiin vertaamalla eri antureiden mitattuja lämpötilaeroja mallin tuottamiin tuloksiin, ja tämän jälkeen hakemalla mallinnsarvoja, joilla mallin tuottamat lämpötilat vastasivat mitattuja tuloksia eri lämmittimen tehoilla.

Käämien lämmönjohtavuuksien suhdetta voidaan myös arvioida kaavalla

$$\frac{\lambda_{\text{eff},z1}}{\lambda_{\text{eff},z2}} = \frac{A_2 \Delta T_2 l_1}{A_1 \Delta T_1 l_2}, \quad (4.7)$$

missä kahden magneetin poikkileikkauksien A_1 ja A_2 läpi kulkeva lämpövirta $\int_A q da$ on oletettu yhtä suureksi. Kaavalla saadut lämmönjohtavuuden suhteet eivät ole täysin virheettömiä, koska siinä tehdään oletus että magneetien sisällä olevat lämpötilagradientit ovat täysin säteen suuntaisia, vaikka näin ei todellisuudessa ole.

5. PYÖRREVIRRAT JA NIIDEN GENEROIMA LÄMPÖ

Toinen tämän työn tavoitteista oli arvioida WIC-johtimissa käytetyn eristeen vaikutusta magneettikuvauslaitteen RF-pulssin mahdollisesti aiheuttamien pyörrevirtojen synnyttämään lämmitystehoon. Muuttuvat magneettikentät indusoivat pyörrevirtoja sähköä johtavissa aineissa. Tämä on seurausta muuttuvan magneettikentän aiheuttamasta sähkömotorisesta voimasta, eli jännitteestä. Pyörrevirrat taas ovat sähkövirtaa, eli ne aiheuttavat häviöitä resistiivisissä aineissa. Häviöt synnyttävät lämpöä, joka kasvattaa järjestelmän lämpökuormaa ja voi pahimmillaan aiheuttaa suprajohtavan manganen quenchin. Tämän takia pyörrevirrat on järkevää huomioida suunniteltaessa muuttuvia magneettikenttiä sisältäviä kryogeenisiä järjestelmiä.

Meissnerin ilmiön takia pyörrevirtoja ei pääse syntymään itse suprajohteessa, mutta suprajohteiden matriisimetallit ovat ilmiölle alttiita. Esimerkiksi suprajohteiden vaihtovirtakäytössä pyörrevirrat ovat hyvin merkittävä tekijä. Myös magneettikuvauksessa syntyy muuttuvia magneettikenttiä gradientti- ja RF-käämien toiminnasta.

5.1 RF-käämin vaikutus suprajohtavaan pääkäämiin

Tavoitteena oli selvittää kuinka suuren lämmitystehon RF-käämin mahdollisesti aiheuttamat pyörrevirrat saavat aikaan kuparia matriisimetallina käyttävässä suprajohtavassa päämagneetissa. Mallinnuksessa pyrittiin huomioimaan työhön liittyvissä koemagneeteissa käytettyjen eristeratkaisuiden paksuuksia.

Jos RF-käämin aiheuttama pulssimainen magneettikentän muutos on tarpeeksi suuri, se voi mahdollisesti aiheuttaa tarpeeksi merkittävän määrän häviöitä, jotta ne tulee huomoida magneettikuvausjärjestelmän suunnittelussa. Syntyvien pyörrevirtojen suuruuteen vaikuttaa kuparin osuus koko magneetissa sekä kupariosien etäisyys

toisistaan. Lisäämällä eristettä kuparikanavien ympärille voidaan kasvattaa kuparielementtien etäisyyttä. Tällöin metallissa ei teoriassa pääse syntymään yhtä suuria pyörrevirtoja, ja syntyvien kokonaishäviöiden tulisi laskea. Oletuksena siis oli, että kuparikanavien ollessa lähes yhdessä häviöt olisivat suurimmat ja ne pienenisivät eristeen paksuuden funktiona.

Yhtenä tekijänä eri eristeratkaisuiden tutkimisessa diplomityössä [1] oli juurikin pyörrevirtojen vaikutusten pienentäminen. Oletuksena oli että suurin vaimentava vaikutus pyörrevirtoihin olisi paksulla PET-eristeellä.

5.2 Pyörrevirtojen indusoituminen ja generoitunut lämpö

Pyörrevirtojen indusoitumista voidaan mallintaa Maxwellin yhtälöillä [35]

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (5.1a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (5.1b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (5.1c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v, \quad (5.1d)$$

missä \mathbf{E} on sähkökentän voimakkuus, \mathbf{H} magneettikentän voimakkuus, \mathbf{D} sähkövuon tiheys ja ρ_v varaustiheys tilavuusyksikköä kohden. Näistä yhtälöistä voidaan edelleen johtaa kaavat [7]

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (5.2a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (5.2b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (5.2c)$$

$$\mathbf{E} = \rho_v \cdot \mathbf{J}, \quad (5.2d)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (5.2e)$$

missä μ on permeabiliteetti. Kyseisiä yhtälöitä voidaan käyttää magneettikentän niin kutsuttuun magnetoquasistaattiseen mallintamiseen, jossa varaus ei pakkaudu.

Maxwellin yhtälöistä voidaan johtaa myös niin sanottu *Maxwell-Ampèren laki* [10, s.249]

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \sigma_s \mathbf{E} + \sigma_s \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}^e + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (5.3)$$

missä \mathbf{v} on nopeus. Nopeus liittyy yhtälön mallintamassa tilanteessa mahdollisesti tapahtuvaan liikkeeseen, mitä ei tämän työn tapauksessa esiinny.

Johteessa tilavuusyksikköä kohti syntyvä lämpöteho voidaan taas laskea yhtälöllä

$$P = \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}. \quad (5.4)$$

Yhtälöstä saadaan siis koko johdinalueella sähkökentän ja virrantiheyden vaikutuksesta syntyvä häviöteho.

5.3 Pyörrevirtamalli

Eristeiden vaikutusta magneetissa generoituvaan lämpöön pyörrevirtojen seurauksena arvioitiin tekemällä niistä ohjelmallinen malli Comsol-ohjelmistolla [9]. Malli koostui kahden päällekkäisen johdinkierroksen yksinkertaistetusta poikkileikkauksesta ja niiden ympärillä olevasta eristeestä.

Poikkileikkaukset mallinnettiin pelkkinä WIC-johtimien kanavan mukaisina suorakaiteen muotoisina kuparikappaleina, koska suprajohteen osuus johtimista on hyvin pieni eikä ydinlangan mallintaminen erikseen ollut haluttujen tuloksien kannalta olennaista. Johtimen mittoina käytettiin eristämättömälle johtimelle arvioituja arvoja, eli leveytenä 1,972 mm ja korkeutena 1,169 mm.

Mallinnus tehtiin taajuustasossa 2-ulotteisena, eli pyörrevirrat aiheuttava muuttuva magneettikenttä ajettiin sinimuotoisena singaalina. Jos käytetään määritelmiä

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \text{ ja} \quad (5.5a)$$

$$\mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A}, \quad (5.5b)$$

sekä konstitutiivisia suhteita $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$ ja $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$, voidaan johtaa COMSOL-ohjelman käyttämä yhtälö magneettikentän mallintamiseen taajuustasossa Maxwell-Ampèren laista 5.3

$$(j\omega\sigma_s - \omega^2\epsilon_0\epsilon_r) \mathbf{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}\mathbf{B}) - \sigma_s \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \mathbf{J}_e, \quad (5.6)$$

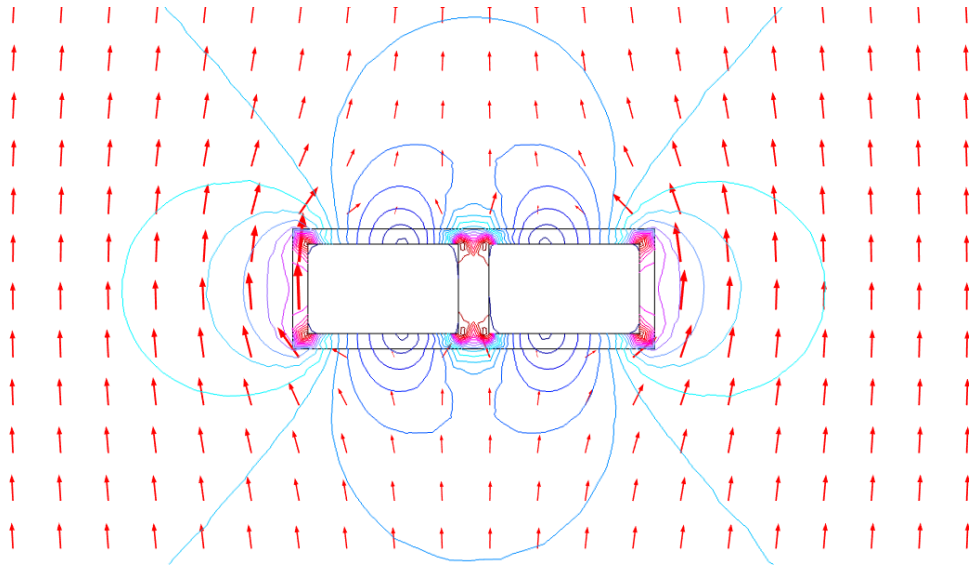
missä \mathbf{A} on vektoripotentiali ja μ_r sekä ϵ_r yksiköttömiä suureita, jotka ilmaisevat aineen permeabiliteetin suhteen tyhjiön permeabiliteettiin $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$ H/m [73, ss. 294,332] ja tyhjiön permittiivisyyteen $\epsilon_0 \approx 8.85 * 10^{-12}$ F/m [73, ss. 88,185].

Koska tässä kyseisessä mallissa ei esiinny liikettä, $\mathbf{v} = 0$. [10, s.249]

Magneettikentän voimakkuuden H_1 amplitudiksi valittiin 100 A/m, ja häviöitä mallinnettiin eri kentän taajuuksilla (20 MHz, 41,9 MHz ja noin 1,5 T kenttää vastaava Larmorin taajuus 63,8 MHz), jotta nähtäisiin kuinka merkittävästi taajuus vaikuttaa häviöihin. Koska mallinnus tehtiin 2-ulotteisena, lämmitysteho saatiin wattina per johtimen pituusyksikkö, eli W/m.

Eristeen vaikutusta havainnoitiin asettamalla johtimien ympärille eri paksuisia eristeeroksia ja laskemalla niiden vaikutusta syntyviin pyörrevirtahäviöihin. Eristeenä mallinnuksessa käytettiin polyvinyylifformaalia (formvar). PET-eristettä ei mallinnettu erikseen, koska myös sen sähkönjohtavuuden voidaan olettaa olevan kupariin verrattuna hyvin lähellä tyhjiön arvoa.

Kuvassa 5.1 on nähtävissä mallinnetut johtimien poikkileikkaukset mallinnusalueella eristeen paksuudella 200 μm ja käytetty magneettivuon tiheys, sekä johtimien pyörrevirtojen synnyttämän magneettikentän vaikutus kyseiseen kenttään. Mallinnusalue valittiin siten että magneettikenttä oli mahdollisimman homogeeninen koko alueella. Alue, jonka koko oli $0,5 \times 0,5$ m tuotti lähes homogeenisen kentän.



Kuva 5.1 Mallinnetut johtimet sekä magneettivuon tiheys.

Mallinnuksessa vaaditut parametrit eri materiaaleille (ja tyhjiölle) ovat suhteellinen permeabiliteetti μ_r ja permittiivisyys ϵ_r sekä sähkönjohtavuus. Taulukossa 5.1 on nähtävissä käytetyt arvot kyseisille suureille.

Taulukko 5.1 Pyörrevirtamallinnuksessa käytetyt parametrit.

Aine	Suhteellinen		Sähkönjohtavuus (S/m)
	permittiivisyys	permeabiliteetti	
Tyhjiö	1	1	0
Kupari	1	1	$5,998 * 10^7$ [9]
Formvar	1	1	$1,190 * 10^{-3}$ [31]

Johtimet mallinnettiin sarjassa kulkeviksi, eli kummassakin johtimessa käytettiin erillistä, yhtä suurta virtaehdot. Tässä tapauksessa valittiin nollavirtaehdot, eli kummassakin kuparikanavassa kulkeva kokonaisvirta asetettiin nolaksi. Nollavirta valittiin, koska haluttiin selvittää kentän aiheuttamaa lämmitystä, eikä suprajohtodemagneetin matriisimetallissa kuuluisikaan kulkea virtaa toiminnan aikana.

Toisin sanoen tilanne mallinnettiin kytkeytymättömänä, eli virtaa ei kulkenut johtimien välillä ja molempiin johtimiin syntyi omat pyörrevirrat. Mallinnuksessa tehtiin siis oletus, että johtimet eivät olisi koskaan täysin kytkeytyneenä, vaan niiden välissä olisi aina vähintään ohut tyhjiö. Tämän takia ei mallinnettu tilannetta, jossa johtimet muodostaisivat täysin yhtenäisen kuparialueen.

6. MITTAUS- JA MALLINNUSTULOKSET

Kolmelle koekäämille suoritettiin sarja mittauksia edellä esitetyillä antureilla ja menetelmillä Tampereen teknillisen yliopiston Sähkötekniikan laitoksen kryolaboratoriossa. Kaikkien käämien mittaukset suoritettiin mahdollisimman samankaltaisesti, jotta tuloksia olisi mahdollista vertailla. Mallinnuksessa tuloksia saatiin kolmen käämin lämmönjohtavuuksille sekä eristeen paksuuden vaikutukselle syntyviin pyörrevirtahäviöihin.

6.1 Mittaukset epoksikerroksen kanssa

Ensimmäinen mittaussarja suoritettiin käämien interfacen puoleisen epoksikerroksen kanssa. Yhden käämin mittauksiin kului aikaa noin viikko. Mittaustulokset epoksikerroksen kanssa on esitetty liitteessä A.

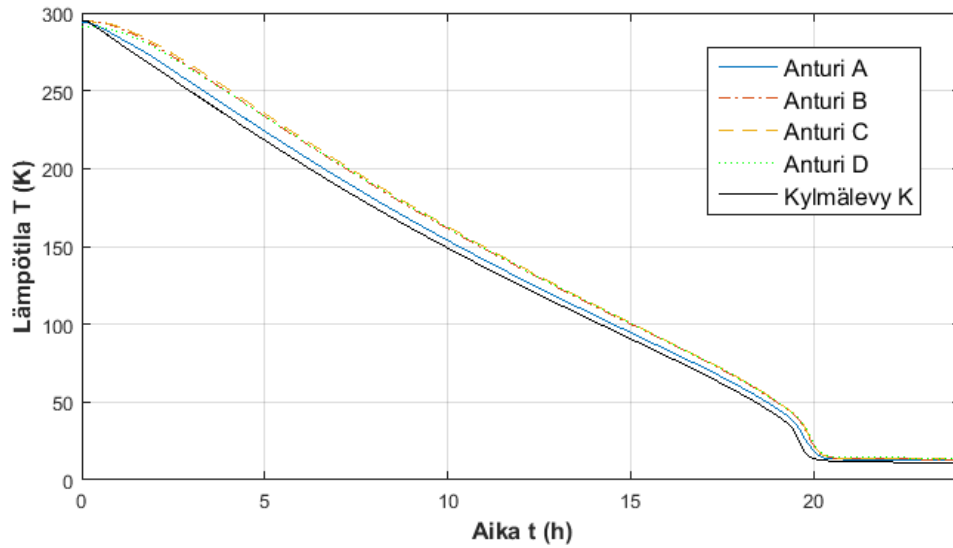
6.2 Mittaukset ilman epoksikerrosta

Käämeille suoritettiin mittaukset myös ilman magneetin päällä olevaa 13 mm paksuista epoksikerrosta. Kyseisissä mittauksissa käämien kiinnitystä muutettiin kiristämällä ne 5 N voimalla interfaceen.

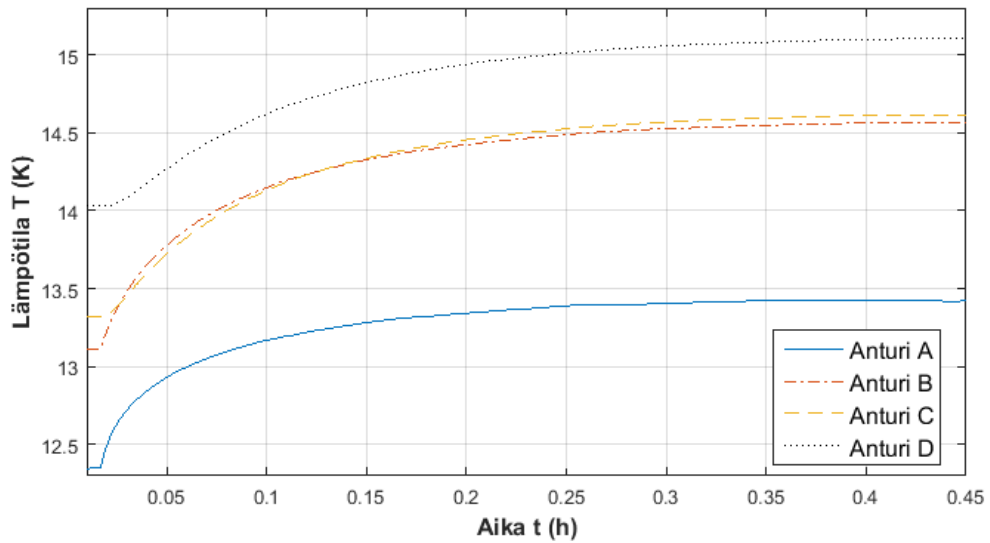
6.2.1 Käämi 1

Mittaukset tehtiin samassa järjestyksessä kuin epoksikerroksen kanssa, eli ensimmäisenä kryostaattiin kiinnitettiin PET-eristetty käämi. Magneetti jäähdyi noin 13 K lämpötilaan, ja kuvassa 6.1 on antureiden lämpötilat jäähdytyksen aikana.

Askelvaste mitattiin jälleen 100 mW teholla, ja mittauksen tulos käämille 1 on nähtävissä kuvassa 6.2. Lämpötilojen tasaantumiseen meni noin 0,5 tuntia, anturin B lämpötilan noustessa 14,56 K:iin.



Kuva 6.1 Koemagneetin 1 antureiden lämpötilat jäädytyksen aikana ilman epoksikerrosta.



Kuva 6.2 Koemagneetin 1 askelvaste ilman epoksikerrosta.

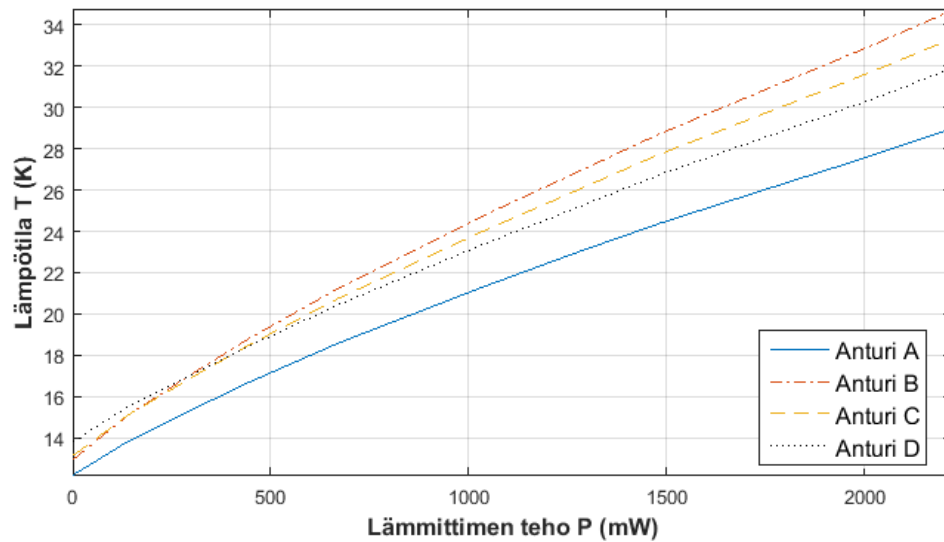
Seuraavaksi käämille suoritettiin lämmitysmittaukset. Ensimmäisenä PI-säätimen asetusarvona käytettiin lämpötilaa 15,09 K ja lämpötilaa nostettiin noin 2 K askeleissa. Taulukossa 6.1 on antureiden näyttämät lämpötilat eri lämmittimen tehoilla ja tehon muutos askeleiden välillä, sekä kylmimmät saavutetut lämpötilat jäädytyksen lopuksi. Käämin 1 mittauksissa kylmälevyn lämpötila pysyi kohtuullisen ta-

saisena riippumatta lämmittimen tehosta.

Taulukko 6.1 Käytetyt lämmittimen tehot sekä käämin 1 antureiden lämpötilat eri tehoilla ilman epoksikerrosta.

Teho (mW)	Muutos (mW)	Antureiden lämpötilat (K)				
		A	B	C	D	K
0	0	12,18	12,93	13,13	13,80	10,79
139,5	139,5	13,83	15,09	15,10	15,51	10,99
300,9	161,4	15,36	17,09	16,92	17,08	11,12
443,9	143,0	16,68	18,79	18,48	18,42	11,24
670,9	227,0	18,59	21,24	20,75	20,44	11,49
1035	363,6	21,29	24,73	23,99	23,35	11,80
1262	227,7	22,90	26,76	25,89	25,06	12,15
1484	221,2	24,39	28,73	27,74	26,75	12,39
1736	252,1	25,94	30,75	29,62	28,46	12,59
1989	253,3	27,48	32,76	31,50	30,19	12,89
2222	233,3	28,98	34,70	33,34	31,88	13,32

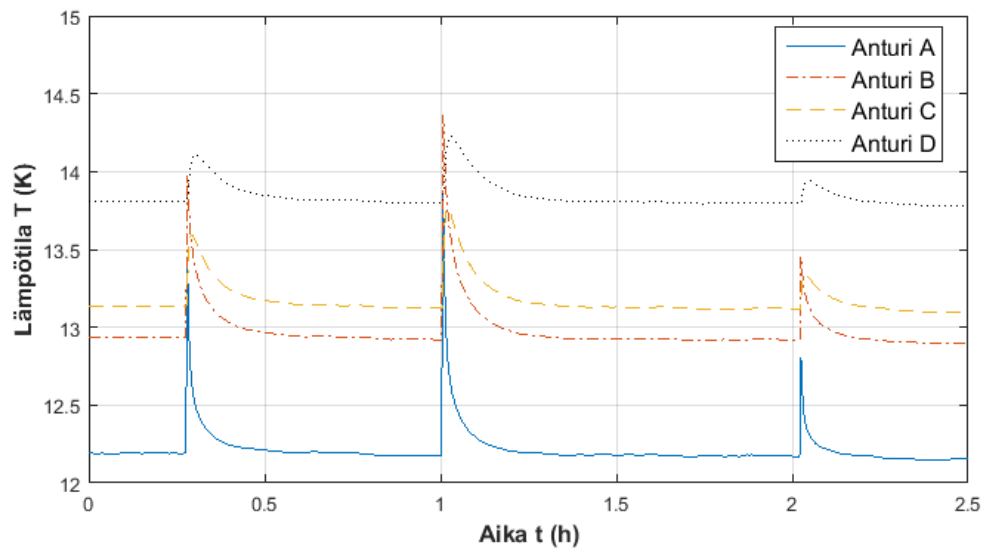
Kuvassa 6.3 on magneetin 1 antureiden lämpötilat lämmittimen tehon funktiona ilman epoksikerrosta. Ilman epoksikerrosta tehdyistä mittauksista on havaittavissa eri antureiden välillä olevien lämpötilaerojen suurentuminen lämmittimen tehoa kasvatettaessa.



Kuva 6.3 Koemagneetin 1 antureiden lämpötilat lämmittimen tehon funktiona ilman epoksikerrosta.

Tällä kertaa mitaustuloksista piirretyt käyrät eivät olleet myöskään täysin lineaarisia. Koska jäähdytyksessä magneetin ja kylmälevyn väliin jäi lämpötilaeroja myös ilman lämmittimen tehoa, täytyy systeemiin tulla ulkoinen lämpökuorma. Tätä lämpökuormaa voidaan arvioida tekemällä sovite kuvaan 6.3 ja arvioimalla negatiivista lämmittimen tehoa kylmälevyn lämpötilassa 10,8 K. Sovitteella arvioitu ulkoinen lämpökuorma on noin 110–210 mW.

Viimeiseksi lämmittimeen syötettiin kolme eri suuruista tehopulssia, joiden vaikutukset antureiden lämpötiloihin mitattiin. Kuvassa 6.4 on lämmittimen tehopulssien aiheuttamat muutokset käämin lämpötilassa ilman epoksikerrosta.



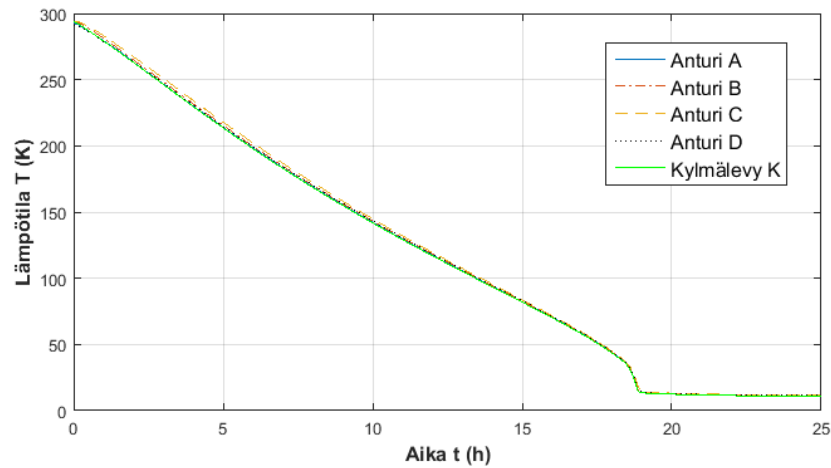
Kuva 6.4 Koemagneetin 1 antureiden lämpötilat lämpöpulssien aikana ilman epoksikerrosta.

Pulssien suuruudet olivat 5,32 J, 11 J ja 15,6 J. Ensimmäinen 5 J mittaus epäonnistui, joten se suoritettiin uudestaan viimeisenä.

Antureiden A ja B lämpötilat nousivat noin 0,5–0,6 K jokaista syötettyä 5 joulea kohti, kun taas antureiden C ja D lämpötilat nousivat noin 0,15–0,2 K. Ilman epoksikerrosta lämpötilat tasaantuivat nopeasti pulssien jälkeen, verrattuna tilanteeseen epoksikerroksen kanssa.

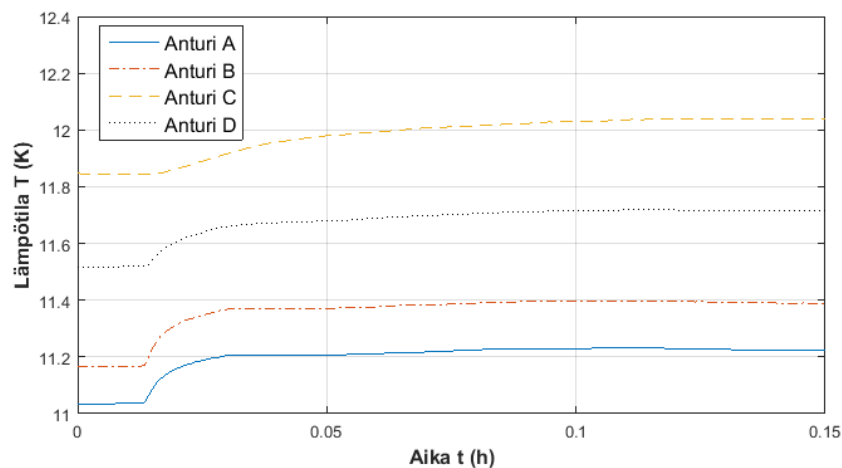
6.2.2 Käämi 2

Seuraavaksi mittauksissa oli jälleen vuorossa eristämätön käämi. Kyseiselle käämil-
le alin saavutettu lämpötila oli noin 11 K. Kuvassa 6.5 on antureiden lämpötilat
jäähdytyksen aikana.



Kuva 6.5 Koemagneetin 2 antureiden lämpötilat jäähdytyksen aikana ilman epoksikerrosta.

Askelvastekokeen tulos 100 mW teholla käämille 2 on nähtävissä kuvassa 6.6. Läm-
pötilojen tasaantumiseen meni noin 7,5 minuuttia, anturin B näyttäessä arvoa 11,39
K.



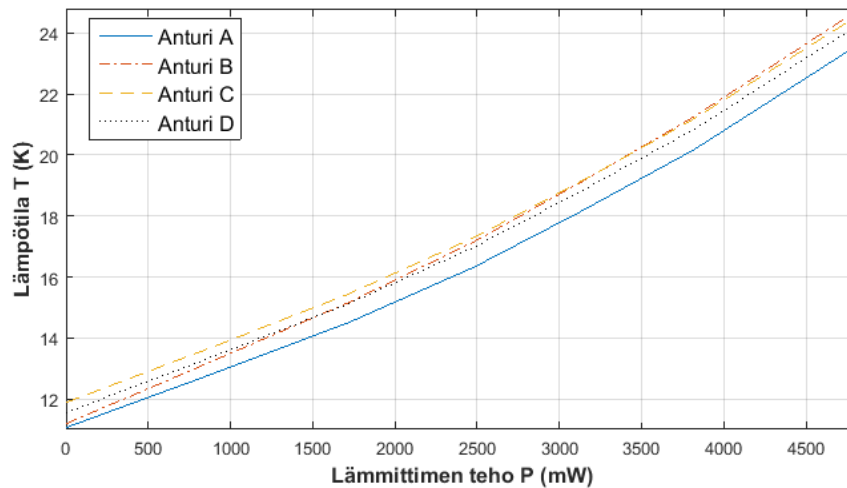
Kuva 6.6 Koemagneetin 2 askelvaste ilman epoksikerrosta.

Myös eristämättömälle käämille mitattiin lämmittimen erisuuruisten tehojen vaikutusta lämpötilajakaumaan. Ensimmäinen lämmittimen asetusarvo oli 13,2 K ja lämpötilaa nostettiin jälleen noin 2 kelvinin askelissa. Taulukossa 6.2 on lämmityksen aikaiset lämmittimen tehot ja antureiden näyttämät lämpötilat sekä magneetin alimmat lämpötilat. Kuten nähdään, nousi kylmälevyn lämpötila huomattavasti enemmän kuin edellisissä mittauksissa.

Taulukko 6.2 Käytetyt lämmittimen tehot sekä käämin 2 antureiden lämpötilat eri tehoilla ilman epoksikerrosta.

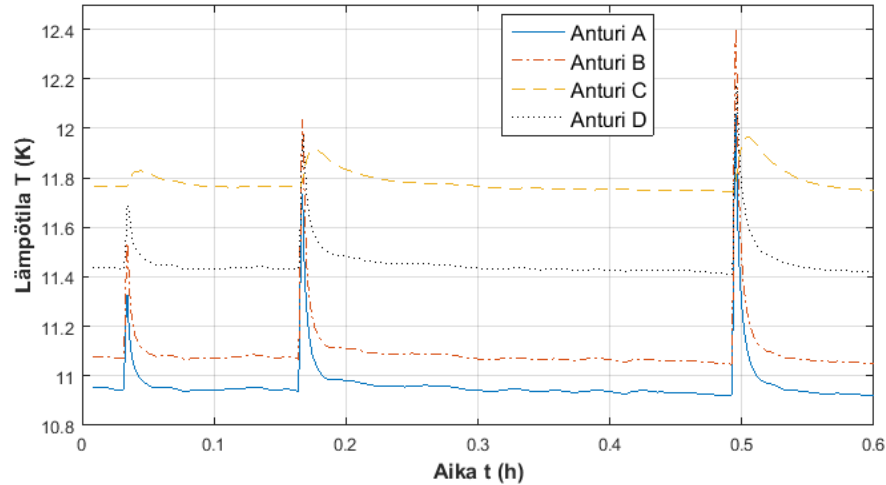
Teho (mW)	Muutos (mW)	Antureiden lämpötilat (K)				
		A	B	C	D	K
0	0	11,032	11,162	11,844	11,515	11,010
874,7	874,7	12,789	13,205	13,668	13,352	11,944
1720	845,8	14,508	15,166	15,446	15,128	13,010
2486	765,2	16,334	17,168	17,303	16,988	14,371
3113	627,6	18,098	19,051	19,081	18,761	15,830
3817	704,3	20,17	21,25	21,18	20,83	17,590
4815	998,0	23,61	24,75	24,57	24,26	20,79

Kuvassa 6.7 on magneetin 2 antureiden lämpötilat lämmittimen tehon funktiona ilman epoksikerrosta. Käyrät eivät olleet jälleen täysin lineaarisia ja antureiden lämpötilaerot kasvoivat lämmittimen tehon suurentuessa.



Kuva 6.7 Koemagneetin 2 antureiden lämpötilat lämmittimen tehon funktiona ilman epoksikerrosta.

Pulssimittaukset suoritettiin jälleen viimeisenä. Kuvassa 6.8 on lämmittimen tehopulssien aiheuttamat muutokset käämin lämpötilassa ilman epoksikerrosta. Syötetyt energiat olivat 4,36 J, 9,80 J ja 14 J.



Kuva 6.8 Koemagneetin 2 antureiden lämpötilat lämpöpulssien aikana ilman epoksikerrosta.

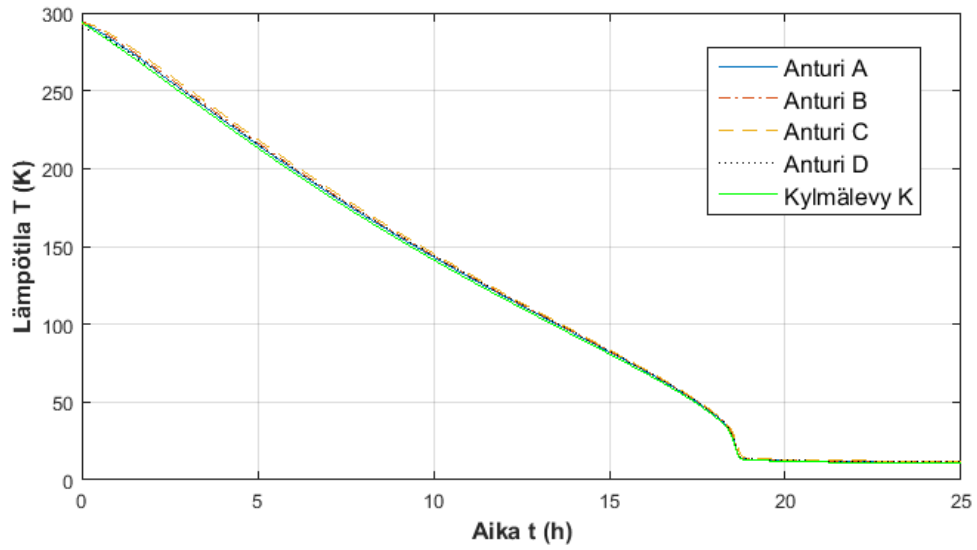
Antureiden A ja B lämpötilat nousivat noin 0,4–0,5 K 5 joulea kohden ja anturin D lämpötila noin 0,25 K. Anturin C lämpötila ei käyttäytynyt oletusten mukaisesti (selitetty luvussa 8.1) ja se nousikin vain noin 0,07 K. Pulssien jälkeen lämpötilojen tasaantumiseen kului vain joitakin minutteja.

6.2.3 Käämi 3

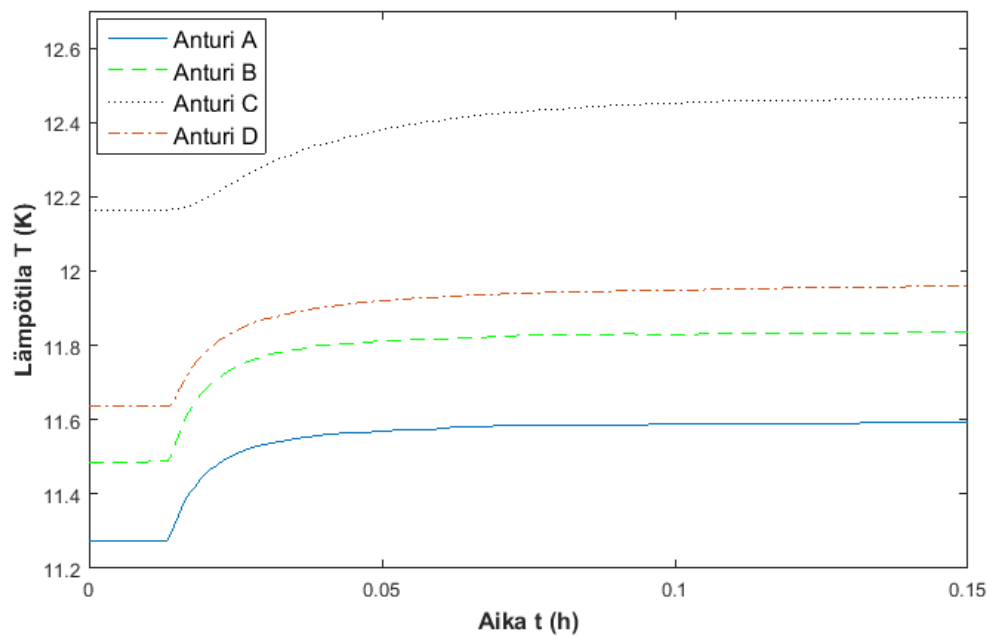
Viimeisenä mitattiin lakkaeristetty käämi ilman epoksikerrosta. Kuvassa 6.9 on antureiden lämpötilat jäähtymisen aikana ja magneetti jäähtyi noin 11,5 K lämpötilaan.

Askelvastekoe suoritettiin jälleen 100 mW teholla ja tulos käämille 3 on nähtävissä kuvassa 6.10. Lämpötilojen tasaantumiseen meni noin 8 minuuttia, anturin B näyttäessä arvoa 11,83 K.

Myös lakkaeristetylle käämille suoritettiin lämmitysmittaus ja lämpötilaväleinä käytettiin samoja arvoja kuin eristämättömässä tapauksessa 24,75 K:iin asti. Taulukossa 6.3 on magneetin alimmat lämpötilat, lämmityksen aikaiset lämmittimen tehot ja antureiden näyttämät lämpötilat.



Kuva 6.9 Koemagneetin 3 antureiden lämpötilat jäädytyksen aikana ilman epoksikerrosta.



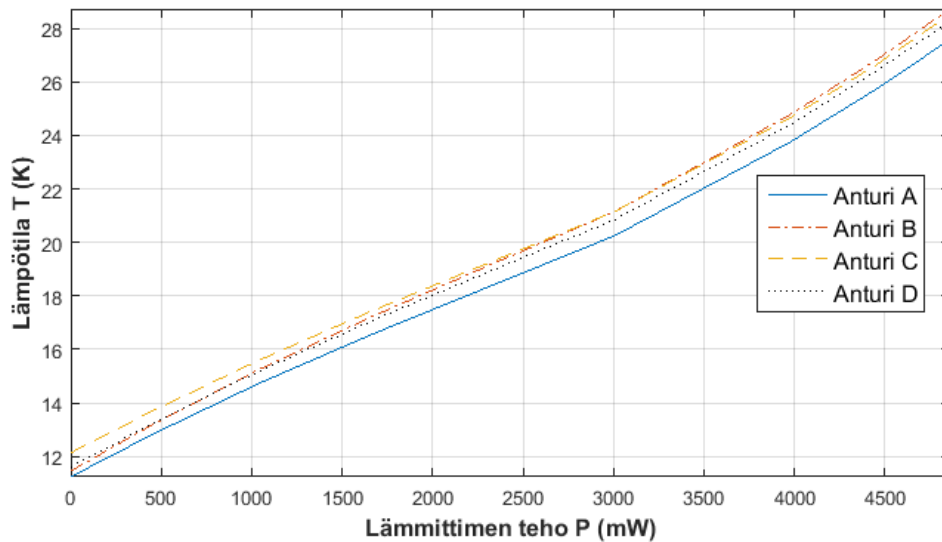
Kuva 6.10 Koemagneetin 3 askelvaste ilman epoksikerrosta.

Kuvassa 6.11 on magneetin 3 antureiden lämpötilat lämmittimen tehon funktiona ilman epoksikerrosta. Lämpötilojen käytös oli hyvin samankaltaista kuin eristämät-

Taulukko 6.3 Käytetyt lämmittimen tehot sekä käämin 3 antureiden lämpötilat eri tehoilla ilman epoksikerrosta.

Teho (mW)	Muutos (mW)	Antureiden lämpötilat (K)				
		A	B	C	D	K
0	0	11,236	11,451	12,134	11,603	10,880
454,1	454,1	12,834	13,196	13,710	13,239	11,426
1035	581,3	14,718	15,233	15,581	15,169	12,168
1656	620,5	16,540	17,196	17,413	17,043	12,943
2294	637,7	18,296	19,089	19,192	18,858	13,733
3009	715,1	20,26	21,16	21,16	20,86	14,806
3974	965,2	23,74	24,77	24,65	24,39	17,428
4449	475,4	25,72	26,81	26,63	26,39	19,111
4860	411,0	27,59	28,73	28,52	28,27	20,79

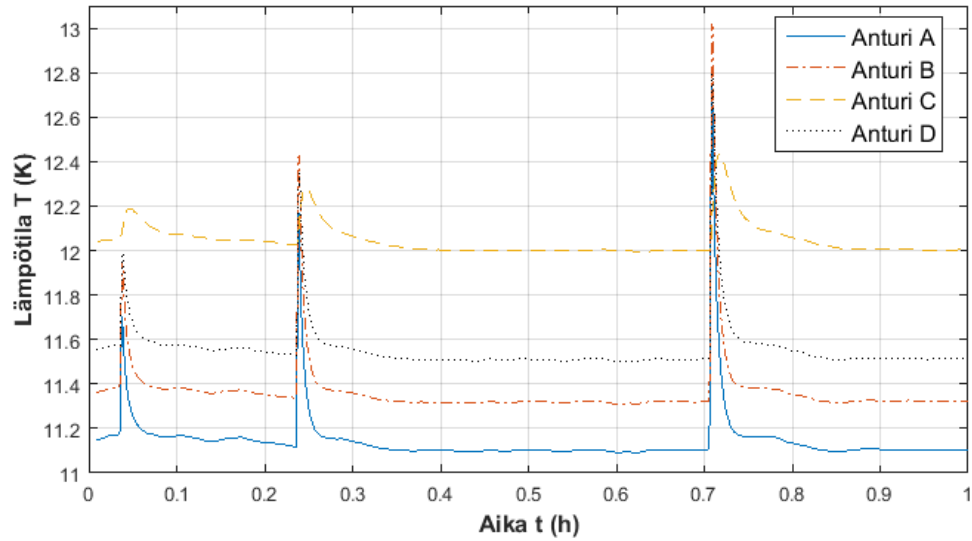
tömälle käämille.



Kuva 6.11 Koemagneetin 3 antureiden lämpötilat lämmittimen tehon funktiona ilman epoksikerrosta.

Kuvassa 6.12 on lämmittimen lämpöpulssien aiheuttamat muutokset käämin lämpötilassa ilman epoksikerrosta. Pulssien energiat olivat 5,3 J, 11,0 J ja 15,6 J.

Antureiden A ja B lämpötilat nousivat noin 0,5–0,6 K jokaista 5 J kohden. Anturin D lämpötila nousi noin 0,4 K, mutta C anturi ei jälleen reagoinut oletetulla tavalla, vaan sen lämpötila nousi vain noin 0,13 K.



Kuva 6.12 Koemagneetin 3 antureiden lämpötilat lämpöpulssien aikana ilman epoksikerrosta.

6.3 Mallien tulokset

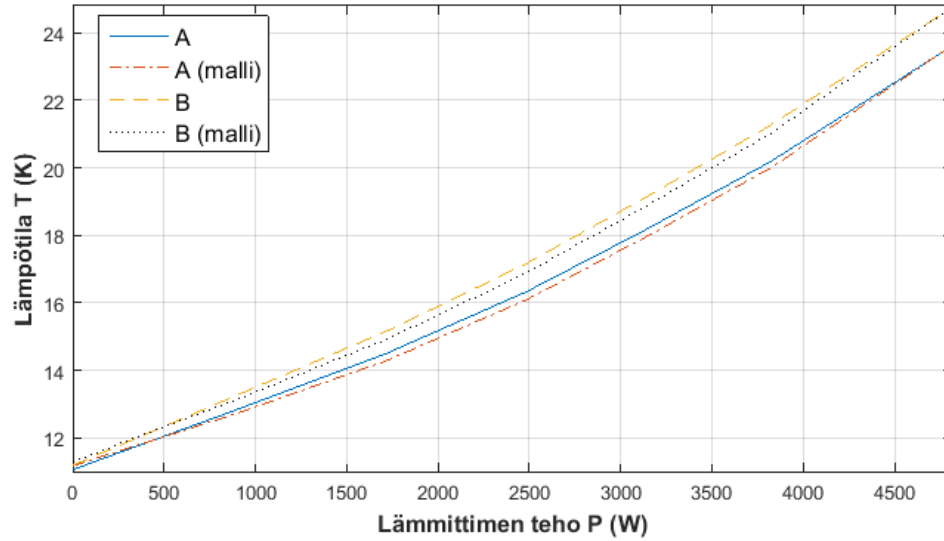
Mallinnus tehtiin lämmönjohtavuudelle ja pyörrevirroille. Tuloksina saatiin tutkittavien käämien arvioidut lämmönjohtavuudet ja eristeen paksuuden vaikutus pyörrevirtahäviöihin.

6.3.1 Lämmönjohtavuus

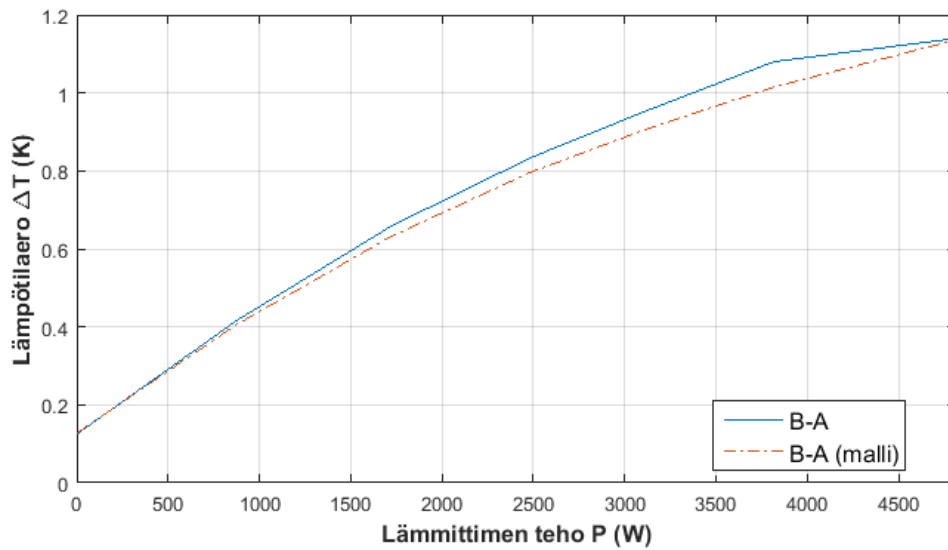
Tietokonemalleja pyrittiin sovittamaan mittaustuloksiin mahdollisimman tarkasti. Sovitus tehtiin erityisesti vertailemalla mittausantureiden A, B ja D lämpötiloja sekä lämpötilaeroja. Kuvassa 6.13 on nähtävissä eristämättömän käämin (2) antureiden A ja B mitatut sekä mallinnetut lämpötilat lämmittimen tehon funktiona.

Kuvassa 6.14 on taas antureiden lämpötilaero lämmittimen tehon funktiona. Kyseinen lämpötilaero oli yksi käytetyistä mallinnusarvoista sovitettaessa mallia mittaustuloksiin.

Kuussa esiintyvälle magneetille mallin antamat mittauspisteiden lämpötilat olivat lähimpänä mittaustuloksia, mutta tarkasteltaessa A- ja B-antureiden lämpötilan erotusta eri magneettien malleissa, virheet olivat lähellä toisiaan.



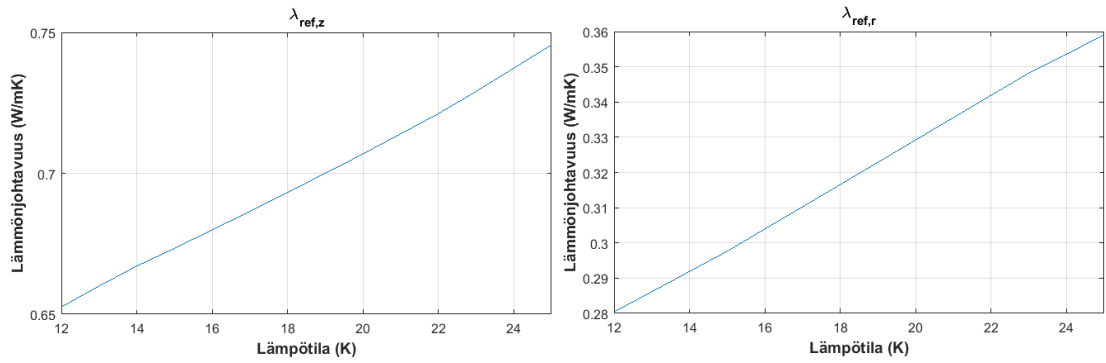
Kuva 6.13 Käämin 2 antureiden A ja B mitatut sekä mallinnetut lämpötilat lämmittimen tehon funktiona.



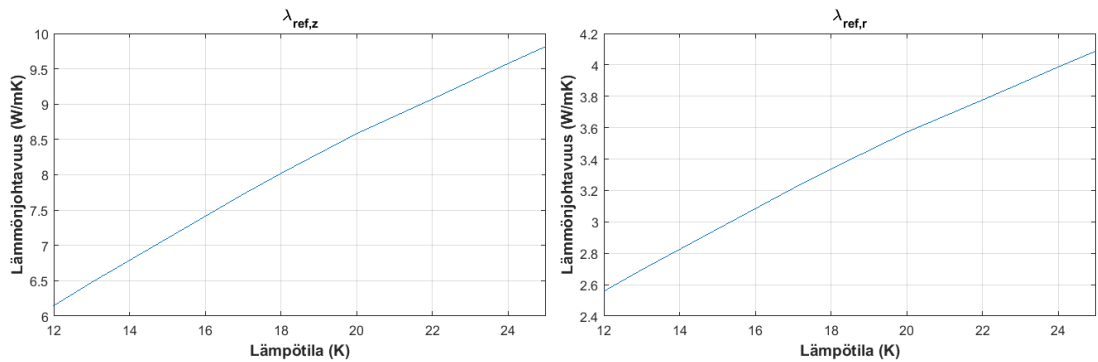
Kuva 6.14 Käämin 2 antureiden A ja B lämpötilaero lämmittimen tehon funktiona.

Mallinnuksessa saatiin käämien pysty akselin ($\lambda_{\text{ref},z}$) ja säteen ($\lambda_{\text{ref},r}$) suuntaiset lämmönjohtavuudet. Kyseiset lämmönjohtavuudet on nähtävissä PET-eristetyille käämille (1) kuvassa 6.15, eristämättömälle käämille (2) kuvassa 6.16 ja lakkaeristetyille käämille (3) kuvassa 6.17. Mittaustuloksia paljaalle käämille oli vain lämpötiloista 11–25 K ja PET-käämille yli 12 kelvinissä, joten kuvat on piirretty vain lämpötiloille

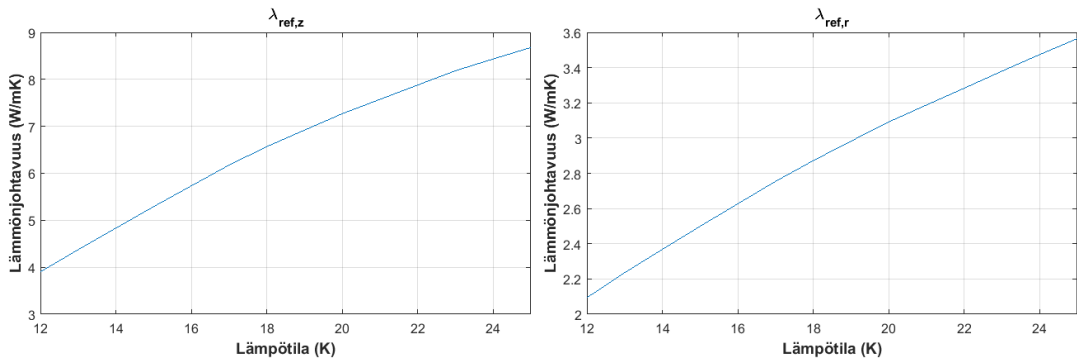
12–25 K.



Kuva 6.15 Mallinnetut lämmönjohtavuudet PET-eristetyille käämille.



Kuva 6.16 Mallinnetut lämmönjohtavuudet eristämättömälle käämille.



Kuva 6.17 Mallinnetut lämmönjohtavuudet lakkaeristetyille käämille.

6.3.2 Pyörrevirrat

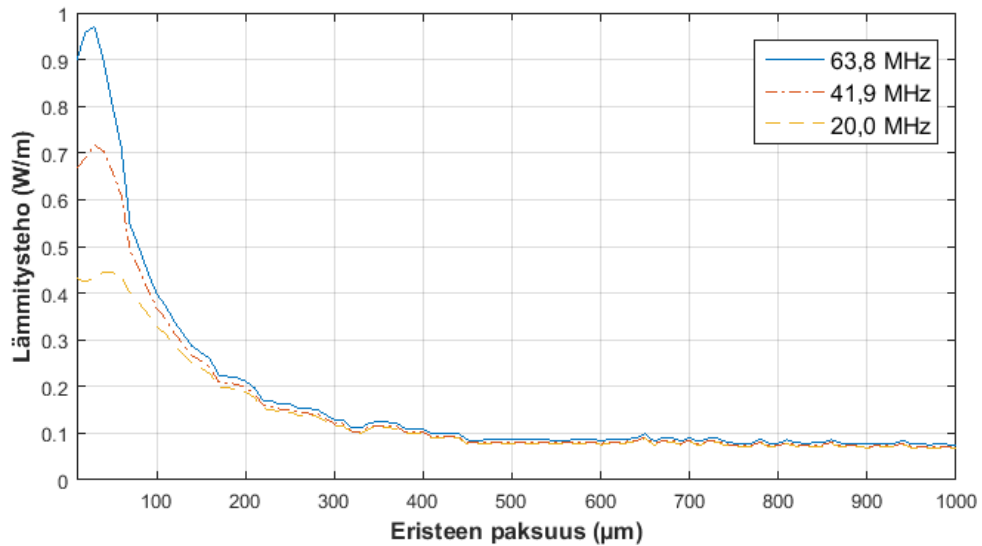
Luvun 5.3 mukaisella mallilla saadut pyörrevirtojen aiheuttamat häviötehot kahdessa johtimessa eri eristeen paksuuksilla magneettikentän taajuudella 63,8 MHz on

esitetty taulukossa 6.4. Häviötehon yksikkönä on W/m, koska mallinnus suoritettiin kaksiulotteisena.

Taulukko 6.4 Pyörrevirtamallinnuksen antamat lämmitystehot taajuudella 63,8 MHz eri eristeen paksuuksilla.

	Eristeen paksuus (μm)							
	10	30	50	100	150	1000	3000	10000
Häviöteho (W/m)	0,90	0,97	0,80	0,40	0,27	0,076	0,068	0,066

Kuvassa 6.18 on pyörrevirtojen aiheuttamat häviötehot johtimen eristeen paksuuden funktiona magneettikentän taajuuden ollessa 63,8 MHz, 41,9 MHz ja 20 MHz. Kuva on piirretty vain 1000 μm eristepaksuuteen, koska tätä suuremmilla eristeillä häviöteho ei pienentynyt enää merkittävästi.



Kuva 6.18 Pyörrevirtojen aiheuttamat häviöt kahdessa päällekkäisessä johtimessa eristeen paksuuden funktiona magneettikentän taajuuksilla 63,8 MHz, 41,9 MHz ja 20 MHz.

7. TULOSTEN ANALYSOINTI

Suoritetuista mittauksista ja tehdyistä COMSOL-malleista voidaan approksimoida RF-käämin mahdollisesti synnyttämien pyörrevirtojen vaikutusta, päätellä käämien lämmönjohtavuuksien suuruutta ja niiden suhdetta, sekä arvioida epoksikerroksen ja magneetin eri osien lämpökontaktien vaikutusta käämien lämmönjohtavuuteen. Mittauksissa ei saavutettu NbTi:n kriittistä lämpötilaa, mutta saatuja tuloksia voidaan kuitenkin käyttää lämmönjohtavuuksien ja niiden käämien välisten suhteiden arvioinnissa.

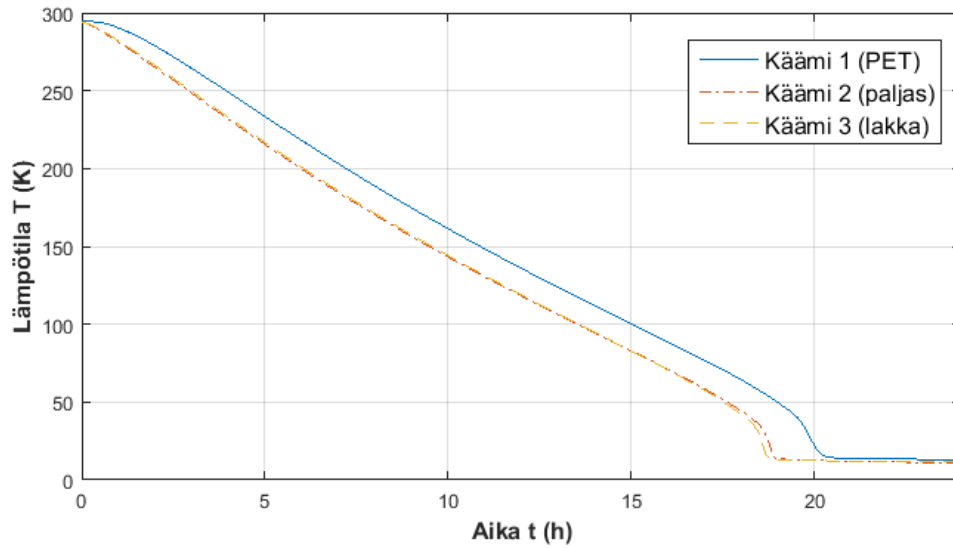
7.1 Mittaustulosten vertailu

Suoritettujen mittausten tavoitteena oli saada vertailukelpoisia tuloksia Anttilan diplomityöhön [1] valmistetuista koemagneeteista. Saaduista tuloksista voitiin taas määrittää käämien lämmönjohtavuuksia.

7.1.1 Käämien jäähtytys ja aikavakiot

Käämeille mitattiin ja laskettiin jäähtymisajat ja aikavakiot molemmissa mittaussarjoissa. Kuten oletettiin, käämien jäähtymisajat lyhenivät ja ne saavuttivat alempia lämpötiloja epoksikerroksen poistamisen jälkeen. PET-eristetty käämi (1) jäähtyi noin 13 K lämpötilaan, paljas käämi (2) noin 11 K lämpötilaan ja lakkaeristetty käämi (3) noin 11,5 kelviniin. Erot epoksikerroksen kanssa mitattuihin alimpiin lämpötiloihin olivat yli 10 astetta käämille 1, 10 K käämille 2 ja noin 7,5 K käämille 3. Kuvassa 7.1 on käämien anturien B lämpötilat jäähtytyksen aikana ilman epoksikerrosta.

Käämit 2 ja 3 jäähtyivät hyvin samankaltaisesti ja ne saavuttivat alimman lämpötilansa lähes samassa ajassa. PET-eristetty käämi jäähtyi hitaimmin, kuten oletettiin. Antureiden lämpötilojen tasaantumiseen kului noin 24 tuntia, kun epoksikerroksen



Kuva 7.1 Koemagneettien B-anturin lämpötilat jäähtymisen aikana ilman epoksikerrosta.

kanssa jäähtymiseen kului noin 44,5 tuntia. Käämin 2 lämpötilat tasaantuivat noin 23 tunnissa ja käämin 3 23,5 tunnissa. Jäähtymisen lopuksi eristämättömän ja lakkaeristetyn käämin alin lämpötila erosi noin 0,5 K, kun taas PET-eristetty käämi jäi 1,5–2 K lämpimämmäksi.

Taulukkoon 7.1 on koottuna käämien jäähtymisaajat, aikavakiot sekä B-anturin lämpötilat jäähtymisen lopuksi epoksikerroksen kanssa ja ilman. Aikavakiot olivat mer-

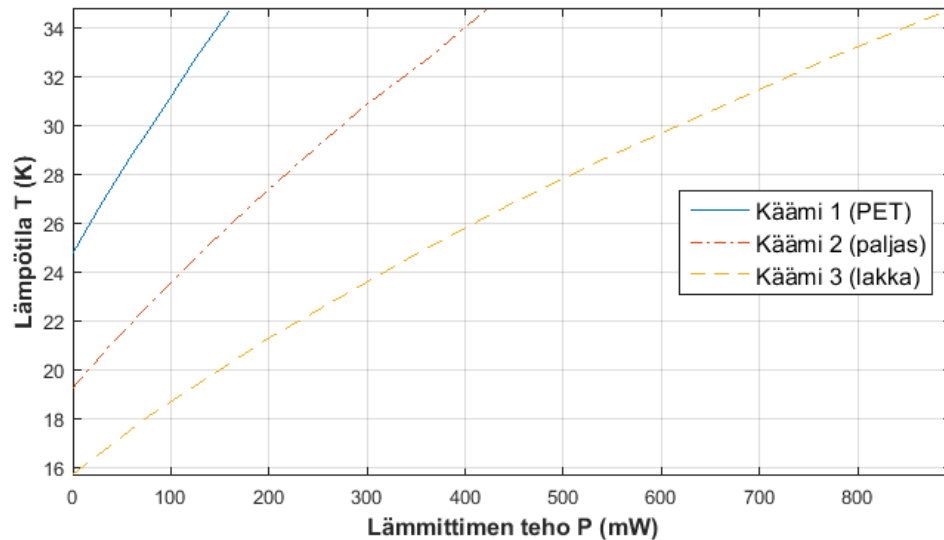
Taulukko 7.1 Käämien jäähtymisaajat, aikavakiot ja B-anturin lämpötilat jäähtymisen lopuksi epoksikerroksen kanssa ja ilman.

Käämi	Jäähtymisaika (h)		Aikavakio (min)		Lämpötila (K)	
	Epoksi	Ilman	Epoksi	Ilman	Epoksi	Ilman
1 (PET)	44,5	24	100	4	24,75	12,93
2 (paljas)	26,5	23	31	0,5	19,24	11,16
3 (lakka)	24,5	23,5	13,5	0,5	15,69	11,45

kittävästi pienemmät ilman epoksikerrosta tehdyissä mittauksissa. Toisin sanoen ylimääräisen lämpöresistanssin poistaminen kylmälevyn ja käämin välistä nopeutti magneettien reagoitua ympäristössä tapahtuviin muutoksiin.

7.1.2 Lämmitysmittaukset

Lämmitysmittausten tavoitteena oli selvittää testikäämien lämpötilojen muutosta tasaisella teholla lämmitettäessä. Kuvassa 7.2 on magneettien anturin B näyttämä lämpötila lämmittimen tehon funktiona epoksikerroksen kanssa. Kuvassa 7.3 on sama vertailu ilman epoksia.

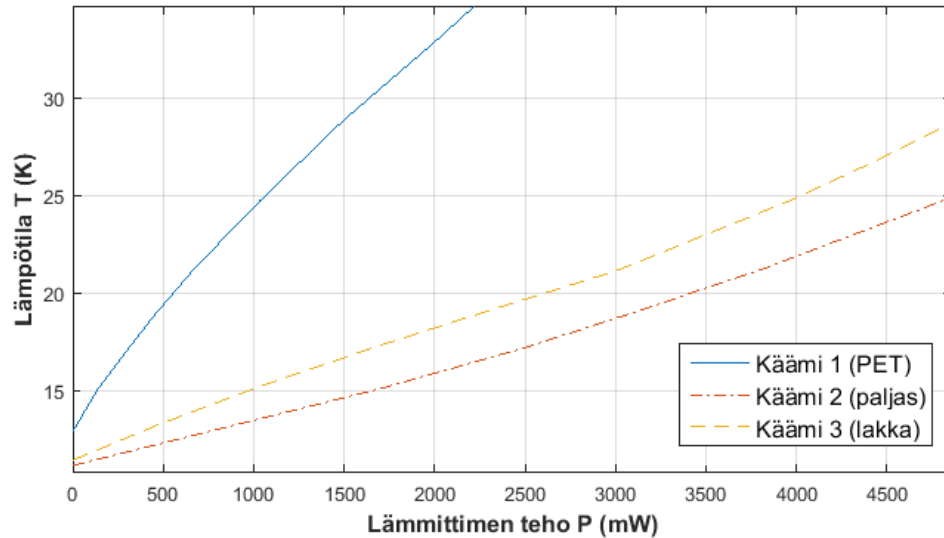


Kuva 7.2 Koemagneettien anturin B lämpötilat lämmittimen tehon funktiona epoksikerroksen kanssa.

Kuten kuvasta 7.2 nähdään, käämin 1 (PET-eriste) lämmittämiseen tarvitaan vähiten lämmittimen tehoa epoksin kanssa. Käämi 3, eli lakkapinnoitetusta johtimesta valmistettu vaati eniten tehoa. Jos verrataan tehoja, joita tarvittiin lämmittämään eri käämejä 24,75 kelvinistä 34,75 kelviiniin, vaati käämi 1 noin 160 mW, käämi 2 noin 300 mW ja käämi 3 noin 550 mW.

Ilman epoksikerrosta eristämättömästä johtimesta valmistettu magneetti vaati eniten lämmitystehoa lämpötilan nostamiseen ja PET-eristetty lämpeni taas pienimmällä teholla. Lämmittimen tehoa 10 K lämpötilan nousuun vaadittiin käämille 1 noin 1200 mW, käämille 2 noin 3800 mW ja käämille 3 noin 3000 mW.

Epoksin kanssa tuotaessa käämiin 1 160,5 mW lämmitystehoa, nousi antureiden lämpötilat noin 10 K anturin B näyttäessä 34,75 K lämpötilaa, kun taas ilman epoksia saman lämpötilan saavuttamiseen vaadittiin 2220 mW teho. Käämissä 2 epoksin



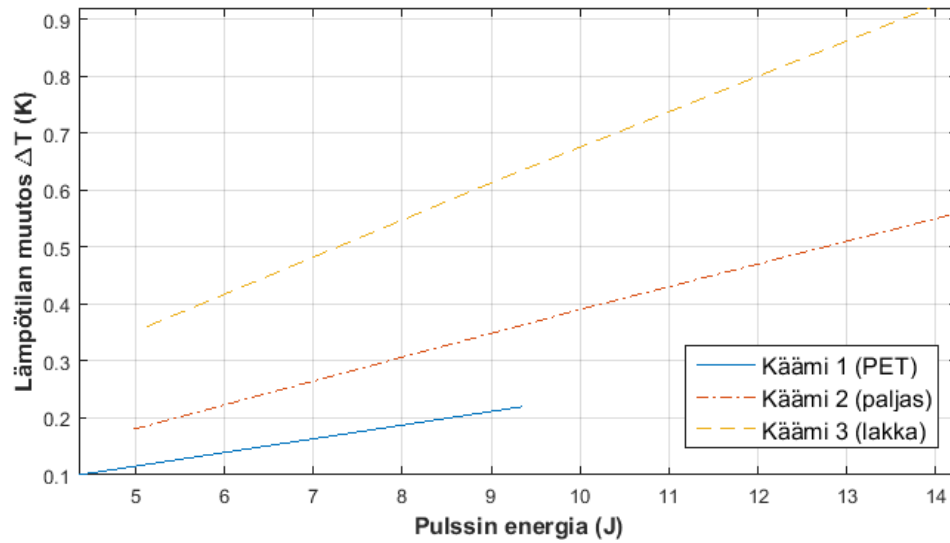
Kuva 7.3 Koemagneettien anturin B lämpötilat lämmittimen tehon funktiona ilman epoksikerrosta.

kanssa lämpötila 34,75 K saavutettiin 424 mW:lla, mutta ilman epoksia lämmittimen tehon ollessa 4820 mW, saavutettiin vain lämpötila 24,75 K. Magneetissa 3 lämpötilan 34,75 K saavuttamiseen vaadittiin 896 mW teho epoksin kanssa ja ilman epoksia teholla 4860 mW lämpötila nousi 28,75 kelviiniin.

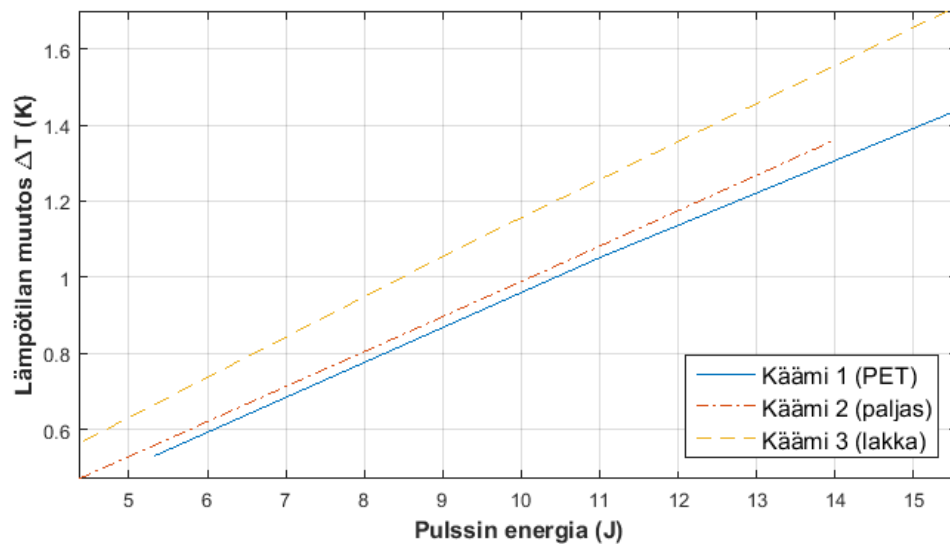
7.1.3 Pulssimittaukset

Pulssimittauksien tarkoituksena oli selvittää magneettiin siirretyn lyhyen energiapulssin vaikutusta käämien lämpötilajakaumaan. Kuvassa 7.4 on eri käämien B-anturin lämpötilan muutos magneettiin siirretyn energian funktiona epoksikerroksen kanssa ja kuvassa 7.5 on samat lämpötilat ilman epoksikerrosta.

Molemmissa mittaussarjoissa lakkaeristetty käämi (3) vaatii vähiten energiaa lämpötilan muutokseen, PET-eristetyn käämin (1) vaatiessa suurimman energian. Tästä voidaan päätellä että käämi 1 reagoi hitaiten muutoksiin, eli sen termien diffusiviteetti on pienin. Käämin 3 nopeinta reagointia ensimmäisessä mittaussarjassa voidaan luultavasti selittää muita magneetteja pienemmällä lämpöresistanssilla kylmälevyn ja epoksikerroksen välissä. Mittaussarjassa 2 pulssimittauksen yleinen virhe (johtuen käämien 2 ja 3 hyvin saman suuruisista aikavakioista) on todennäköisesti liian merkittävä, jotta eristämättömän ja lakkaeristetyn käämin välille oltaisiin



Kuva 7.4 Koemagneettien anturin B lämpötilan muutos magneettiin siirretyn energian funktiona epoksikerroksen kanssa.



Kuva 7.5 Koemagneettien anturin B lämpötilan muutos magneettiin siirretyn energian funktiona ilman epoksikerrosta.

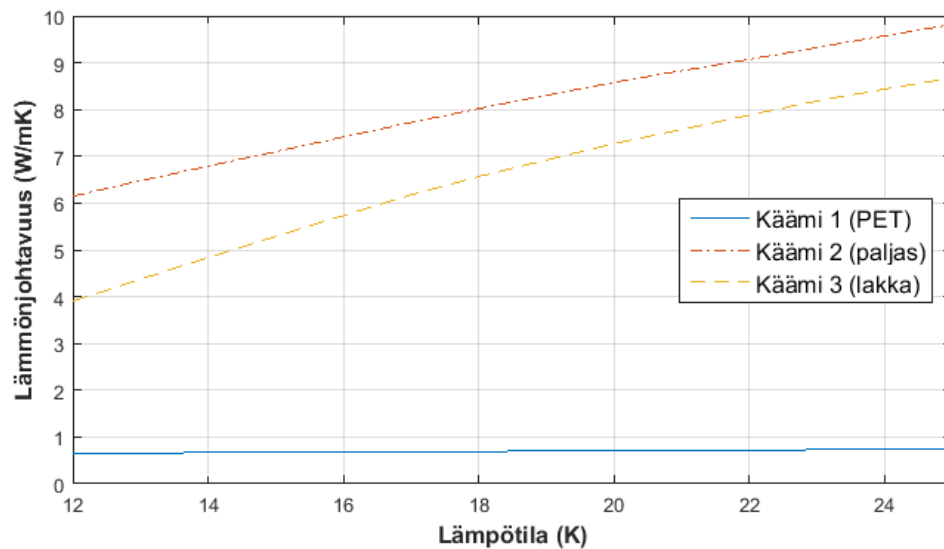
kyetty saamaan riittävän erilaisia tuloksia.

Ilman epoksikerrosta tehdyissä mittauksissa antureiden lämpötilat nousivat huomattavasti enemmän ja lämpötilat tasaantuivat nopeammin energiapulssien jälkeen.

Tästä voidaan päätellä, että magneettien terminen diffusiviteetti oli suurempi ilman epoksikerrosta, ja kun tiheys sekä ominaislämpökapasiteetti oletettavasti pysyy lähes samana, todennäköinen selittävä tekijä on koko magneetin efektiivisen lämmönjohtavuuden kasvaminen. Tulos on oletuksen mukainen, koska ensimmäisessä mittaus-sarjassa ylimääräisen epoksikerroksen yli oletettiin suuri lämpötilagradientti.

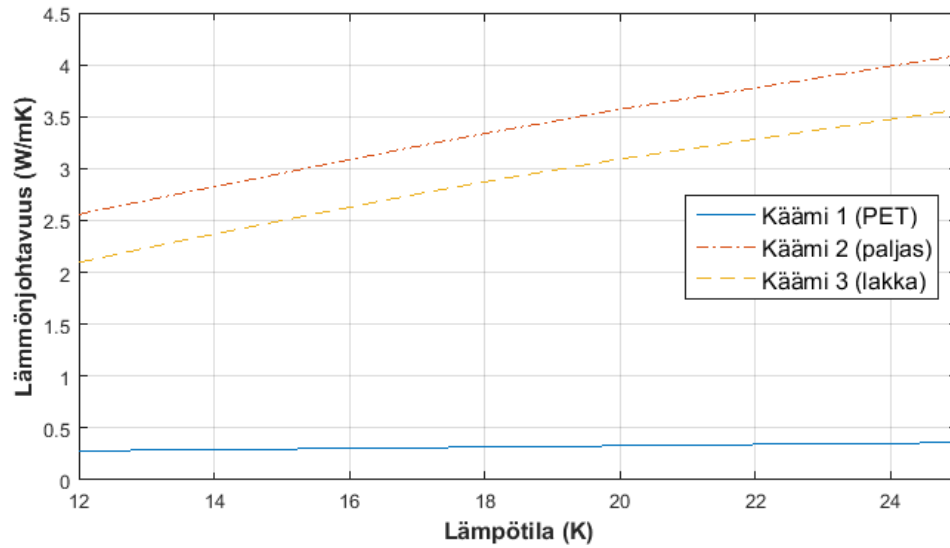
7.2 Käämien lämmönjohtavuudet

Mittaustuloksista mallinnettuihin lämmönjohtavuuksiin vaikuttivat useat eri tekijät, kuten magneetin ja kylmälevyn välinen lämpökontakti ja käämin rakenteiden väliset kontaktit. Luvun 6.3.1 mukaisilla lämmönjohtavuuksilla mallit vastasivat koh-talaisen hyvin mitattuja tuloksia. Kuvassa 7.6 on kaikkien käämien mallinnetut z-suuntaiset lämmönjohtavuudet ja kuvassa 7.7 r-suuntaiset lämmönjohtavuudet.



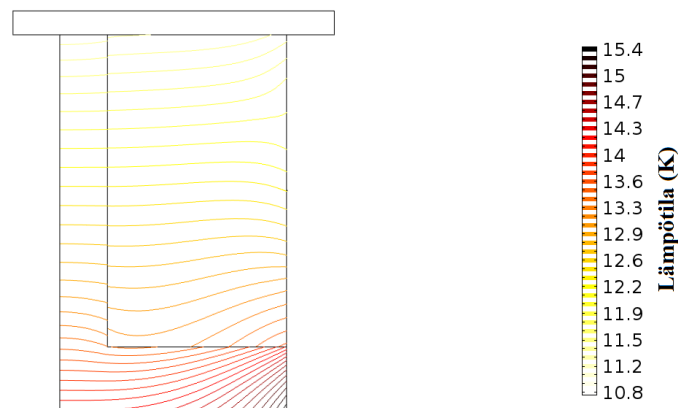
Kuva 7.6 Käämien johdinosien mallinnetut z-suuntaiset lämmönjohtavuudet.

Käämien r-suuntaiset lämmönjohtavuudet eivät vaikuttaneet lämpötilajakaumiin yhtä merkittävästi kuin z-suuntaiset, mutta myös niillä oli vaikutusta mallinnuksessa eri mittauspisteiden välisiin lämpötilaeroihin. Kaikista malleista saadut r-suuntaiset lämmönjohtavuudet olivat pienemmät kuin z-suuntaiset. Tämä johtuu käämien anisotrooppisuudesta, eli käämikerrosten välissä oli epoksia ja myös kuparin kokonaisu-määrä r-suunnassa on pienempi johtuen WIC-johtimien epäsymmetrisestä muodosta.



Kuva 7.7 Käämien johdinosien mallinnetut r -suuntaiset lämmönjohtavuudet.

Kaavalla 4.7, joka olettaa käämien z -suunnassa kulkevat lämpövirrat yhtä suuriksi tietyllä lämpötilagradientilla, käämien 1 ja 2 lämmönjohtavuuden suhteeksi saadaan noin 7, käämien 1 ja 3 noin 4 ja käämien 2 ja 3 välillä on noin 1,7, tilanteessa jossa lämmittimeen ei syötetä tehoa. Laskennassa käytettiin antureiden A ja B lämpötiloja mittauksista ilman epoksikerrosta ja kuten todettua, yhtälössä oletetaan, että lämpötilajakuma käämin sisällä A- ja B-antureiden kohdalla on täysin säteen suuntainen. Mallinnettaessa tilanne oli kuitenkin kuvan 7.8 mukainen, kun lämmittimen tehona oli 0 W.



Kuva 7.8 Mallinnetut lämpötilagradientit käämissä 1 lämmittimen teholla 0 W.

Taulukossa 7.2 on koottuna käämeille mallien tuloksista kaavalla 4.6 arvioidut anisotrooppisuudet eri lämpötiloissa. Mukana on myös mallinnetut lämmönjohtavuudet kyseisissä lämpötiloissa.

Taulukko 7.2 Käämien lämmönjohtavuudet sekä anisotrooppisuudet eri lämpötiloissa arvioituna kaavalla 4.6.

Lämpötila	$\lambda_{\text{ref},z}$ (W/mK)			$\lambda_{\text{ref},r}$ (W/mK)			$\lambda_{\text{ref},z}/\lambda_{\text{ref},r}$		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
12	0,63	6,1	3,9	0,28	2,6	2,1	2,23	2,40	2,12
18	0,67	8,0	6,6	0,32	3,3	2,9	2,10	2,40	2,38
24	0,71	9,6	8,4	0,35	4,0	3,5	2,00	2,40	2,45

Taulukossa 7.3 taas on eri käämien mallinnettujen sekä kaavalla 4.7 laskettujen z-suuntaisten lämmönjohtavuuksien suhteet. Malleista laskettu suhde on mittauksissa saavutetuissa alimmissa lämpötiloissa mallinnettujen lämmönjohtavuuksien suhde, joka PET-eristetyille käämille (1) on noin 12 K sekä lakkaeristetyille (2) ja eristämättömälle käämille (3) noin 11 K.

Taulukko 7.3 Käämien mallinnettujen ja kaavalla 4.7 laskettujen z-suuntaisten lämmönjohtavuuksien suhteet

	$\lambda_{\text{ref},z2}/\lambda_{\text{ref},z1}$	$\lambda_{\text{ref},z3}/\lambda_{\text{ref},z1}$	$\lambda_{\text{ref},z2}/\lambda_{\text{ref},z3}$
Malli	9,25	5,44	1,70
Kaava 4.7	6,89	4,00	1,72

Kuten taulukosta nähdään, kaavalla 4.7 saadut tulokset ovat mittaustulosten ja mallien perusteella laskettujen arvojen kanssa samaa suuruusluokkaa. PET-eristetyn käämin (1) lämmönjohtavuus alimmassa mittauspisteessä oli virhetarkastelun (esitetty luvussa 8.2) perusteella hieman mallinnettua suurempi, joten todelliset suhteet $\lambda_{\text{ref},z2}/\lambda_{\text{ref},z1}$ ja $\lambda_{\text{ref},z3}/\lambda_{\text{ref},z1}$ ovat luultavasti lähempänä kaavalla saatuja tuloksia.

7.3 Pyörrevirtojen vaikutukset

Kuten mallinnetuista tuloksista piirretystä kuvasta 6.18 nähtiin, pyörrevirtojen vaikutus näyttäisi pienenevän kun eristeen paksuutta kasvatetaan, ja suurimmat häviöt näyttäisivät syntyvän eristeen paksuuden ollessa noin 30 μm . Samasta kuvasta nähdään myös häviöiden vahva riippuvuus magneettikentän taajuudesta, ja suuremmilla taajuuksilla syntyvät häviöt kasvavat. Myös eristeen suhteellinen merkitys kasvaa,

eli esimerkiksi 20 MHz:in taajuudella häviöt pienenevät suhteellisesti vähemmän eristeen paksuuden funktiona kuin 63,8 MHz:issä.

Taulukossa 7.4 on esitettyinä ne eristeen paksuudet joilla lämmitysteho on eri taajuuksilla pienentynyt noin puoleen suurimmasta arvostaan. Alin häviötaso näyttäisi kuitenkin kyeisessä yksinkertaisessa mallissa olevan lähes taajuudesta riippumaton.

Taulukko 7.4 Eristepaksuudet joilla lämmitysteho on taajuuksilla 20 MHz, 41,9 MHz ja 63,8 MHz pienentynyt noin puoleen suurimmasta arvostaan.

	Taajuus (MHz)		
	20	41,9	63,8
Eristepaksuus (μm)	160	100	80

Taajuuden lisäksi häviöiden suuruuteen vaikuttaa merkittävästi myös magneettikentän voimakkuus; kun \mathbf{H} :n amplitudi kasvaa 10-kertaiseksi, häviöt 100-kertaistuvat. Tämä vaikuttaa kuitenkin vain häviöiden suuruuteen, eli eriste pienentää häviöitä edelleen samassa suhteessa.

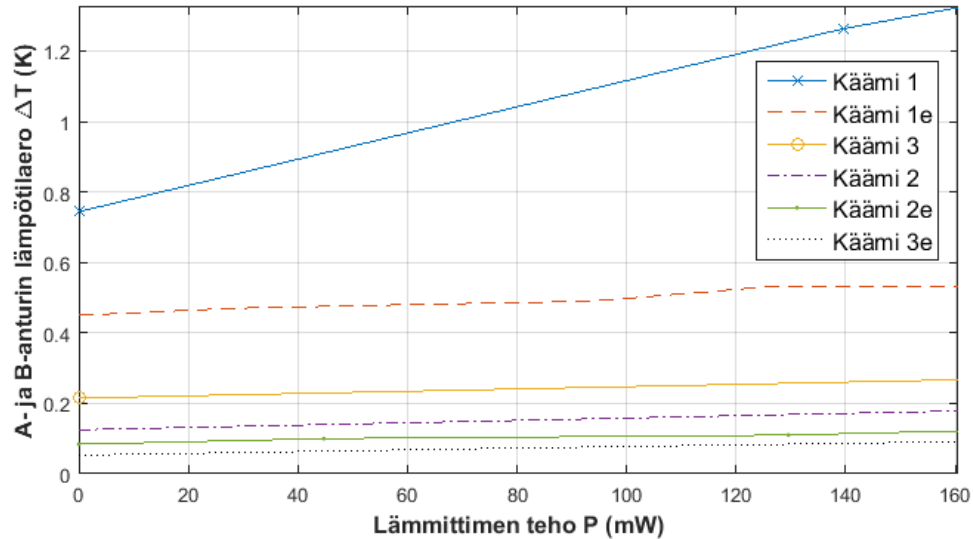
7.4 Johtopäätökset

Mittaustuloksien ja tehtyjen mallien perusteella eristämättömästä WIC-johtimesta valmistetun magneetin lämmönjohtavuus on suurin kummassakin tutkitussa suunnassa. Lakkaeristetyn käämin lämmönjohtavuudet näyttäisivät olevan jonkin verran pienemmät. Kuten oletettua PET-eristetyn magneetin lämmönjohtavuus oli selvästi pienin kummassakin suunnassa. Lähellä 10 kelvinin lämpötilaa saatujen tulosten perusteella PET-eristeen käyttö alentaa magneetin z-suuntaista lämmönjohtavuutta noin 90 % eristämättömään tilanteeseen nähden. Lakkaeristeen vaikutus on jonkin verran pienempi, ehkä noin 20–40 %, mutta myös se oli havaittavissa mittauksissa.

Malleista saadussa anisotropiassa käämien välillä ei ole riittävän merkittäviä eroja luotettavien johtopäätösten tekemiseen, johtuen mallinnustulosten mahdollisesta virheestä. Toisaalta tämä saattaa olla seurausta impregnoinnista, eli johdinkerrosten väleissä olevat epoksikerrokset alentavat lämmönjohtavuutta samassa suhteessa kaikissa käämeissä.

Käämin ja kylmälevyn välissä olleella epoksikerroksella on mittaustulosten ja mallinuksen perusteella merkittävä vaikutus käämin koko lämmönjohtavuuteen. Kerros ei

vaikuta pelkästään siihen kuinka kylmäksi käämi jäähtyy ja kuinka paljon järjestelmään tuleva teho nostaa magneetin koko lämpötilaa, vaan jonkin verran myös magneetin eri osien välille syntyviin lämpötilaeroihin. Tämä on nähtävissä kuvassa 7.9, jossa on piirrettynä antureiden A ja B lämpötilaero lämmittimen tehon funktiona ilman epoksikerrosta ja sen kanssa. Käyrien merkintä *e* tarkoittaa epoksikerroksen kanssa tehtyjä mittauksia.



Kuva 7.9 Käämien A- ja B-antureiden lämpötilaero lämmittimen tehon funktiona epoksikerroksen kanssa ja ilman. Epoksikerrokselliset käyrät merkitty *e*llä.

Kuvasta nähdään, että vaikka oletetusti eristämättömän käämin (2) lämmönjohtavuus on paras, syntyy siihen epoksikerroksen kanssa suurempi lämpötilaero antureiden välille kuin lakkaeristettyyn käämiin (3). Kuitenkin ilman epoksia käämille 2 mitattiin pienimmät lämpötilaerot ja PET-eristetyn käämin (1) erot olivat aina suurimmat, kuten voitiin olettaa. Kuvasta nähdään myös, että epoksikerros, eli ylimääräinen lämpöresistanssi magneetin ja kylmälevyn välissä, itse asiassa pienentää antureiden välille jäävää lämpötilaeroa, kun taas efektiivisten lämmönjohtavuuksien pieneneminen kasvatti kyseisiä eroja. Tätä voidaan selittää osittain epoksikerroksen aiheuttamalla korkeammilla lämpötiloilla mittausten aikana, jolloin myös aineiden lämmönjohtavuudet olivat korkeampia.

Myös käämin eri osien ja kylmälevyn kontakti keskenään näyttävät vaikuttavan merkittävästi magneetin käyttäytymiseen. Tämän takia eri pintojen huolellinen puhdistus on tärkeää magneetteja kylmälevyyn kiinnitettäessä, jotta osien väliin ei jää suu-

ria lämpöresistansseja. Myös tiukka kiinnitys kylmälevyyn voi parantaa magneetin kokonaislämmöjohtavuutta.

Kaikkien testattujen magneettien, myös eristämättömän, lämmönjohtavuus on kaukana kuparista, koska vierekkäiset käämikierrokset eivät ole täydellisessä lämpökontaktissa ja päällekkäisten kierroskerrosten välissä on epoksia. Toisaalta PET-eristetyn käämin lämmönjohtavuuden arvoilla ei kylmälevyn ja magneetin väliin jäänyt enää kovin suurta lämpötilaeroa (noin 2 K), ja se myös jäähdyi lähes samaan lämpötilaan kuin eristämättömästä ja lakkaeristetystä johtimesta valmistetut magneetit.

Mittauksissa 10 K lämpötilan nousuun vaadittu lämmitysteho vaihteli välillä 160–3800 mW eri käämeissä, eli kokonaislämmönjohtavuudella (johon kuuluu myös lämpöresistanssit osien välillä, sekä epoksikerros käämin ympärillä) on merkittävä vaikutus stabiilisuuteen. Tasaista lämpötehoa tarkasteltaessa eristämättömässä käämissä tapahtuva quench voisi vaatia noin 10 kertaisen tehon verrattuna PET-eristettyyn käämiin. Pulssimittauksissa PET-eristetty käämi (1) reagoi hitaiten tuotuun energiaan ja lämpötilan nousu jäi alhaisimmaksi, mutta toisaalta mittausanturit eivät olleet aivan lämmittimen vieressä. Kun lämmönjohtavuus on pienempi, kuten se mallien perusteella käämissä 1 oli, lämpötilan nousu lämpölähteen läheisyydessä on luultavasti suurempi ja quench myös näin ollen todennäköisempi.

Pyörrevirtojen vaikutukset näyttäisivät pienenevän eristeen paksuuden funktiona, mutta eristeellä, jonka paksuus on alle 30 μm ei näyttäisi olevan suurta vaikutusta. Tämä saattaa johtua RF-signaalin suuresta taajuudesta tai käytetyn mallinnuksen epätarkkuudesta ja yksinkertaisuudesta (vain 2 johdinta).

8. VIRHEARVIO

Mittauksissa ja malleissa oli useita tekijöitä, jotka aiheuttivat tuloksiin epävarmuutta ja todennäköisesti virheitä. Näitä virhelähteitä oli esimerkiksi mittauksissa käämien päällä ollut epoksikerros ja eri antureiden kiinnitys. Lämmönjohtavuusmallinnuksessa epävarmuutta aiheuttivat eri kontaktiresistanssit ja magneettien sisäinen rakenne (jota ei tunnettu), sekä pyörrevirtamallinnuksessa käytetty korkea taajuus ja yksinkertaistettu tilanne.

8.1 Mittaukset

Mittauksissa anturit A, B ja D käyttäytivät oletusten mukaisesti, mutta anturissa C oli havaittavissa poikkeamaa. C-anturin lämpötila ei aina reagoinut oletetulla nopeudella esimerkiksi pulssimittauksissa syötettyyn energiaan, vaan se “laahasi” muiden antureiden perässä. Yksi mahdollinen tekijä tähän oli anturin kiinnitys käämiin (eli anturi ei ollut kiinnittynyt hyvin johtimien kupariin), mikä saattoi olla heikompi kuin muiden antureiden. Tämän takia anturilla C mitatut lämpötilat eivät välttämättä ole täysin luotettavia, joten mallinnuksessa keskityttiin pääosin muiden antureiden näyttämiin lämpötiloihin.

8.2 Lämmönjohtavuusmallinnus

Mittaustulokset ja mallit saatiin vastaamaan toisiaan kohtuullisen hyvin, tosin jotta mallikäämien ylin lämpötila saatiin vastaamaan mittaustuloksia, vaati se kussakin mallissa eri suuruisia kontaktiresistansseja interfacen ja käämin välissä. Kyseinen kontaktiresistanssi vaikutti pääosin vain käämin saavuttamaan lämpötilaan tietyllä lämmitysteholla, eri antureiden lämpötilaero taas määräytyi pääosin lämmönjohtavuudesta.

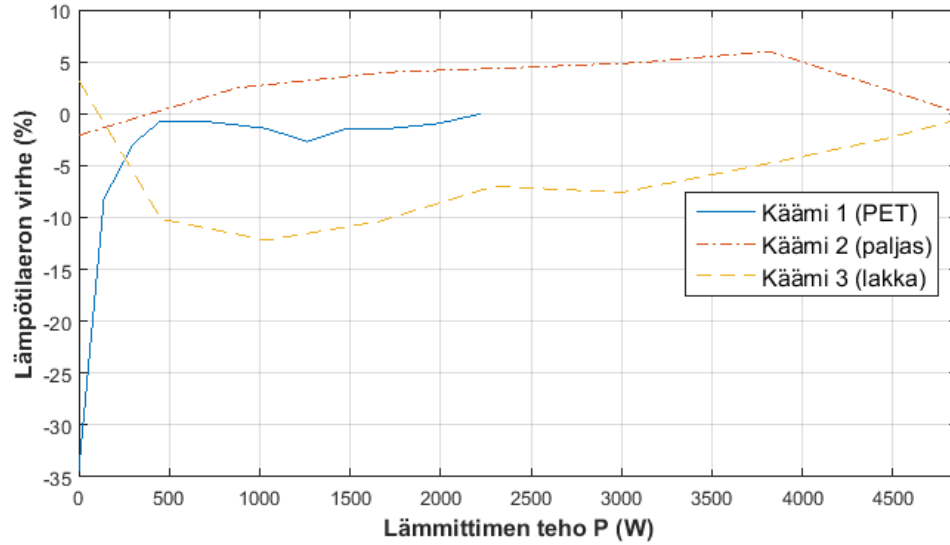
Mahdollisia virheitä mallien tuloksiin tuottivat monet suureet joiden todellisia arvoja ei tunnettu, vaan ne olivat jonkinlaisia arvioita saatavilla olevan tiedon ja joissakin

tapauksissa mallinnustuloksien pohjalta. Tällaisia tuntemattomia suureita ovat eri osien väliset kontaktiresistanssit, käämiin säteilemällä tuleva lämpö, eri eristemateriaalien ja epoksin todellinen määrä käämialueen sisällä sekä eristeiden ja epoksin tarkat lämmönjohtavuudet. Magneettien sisäosien rakennetta ei myöskään tunnettu tarkasti, eli johdinkierrosten ja kerrosten välissä saattoi olla esimerkiksi pieniä ilmarakoja tai muita epätasaisuuksia, joita ei mallinnuksessa kuitenkaan pystytty huomioimaan.

Lämmönjohtavuusmallinnuksessa eri mallien ja mittaustulosten välille jäi jonkin suuruinen virhe. Mallin antamat mittauspisteiden lämpötilat olivat lähimpänä mittaustuloksia eristämättömälle käämille, mutta myös lakkaeristetylle käämille (3) antureiden A ja B lämpötilaeron virhe oli suurimmillaan alle 0,1 K. PET-eristetylle käämille (1) virhe oli suurimmillaan noin 0,25 K alimmassa mittauspisteessä. Kyseinen lämpötilaero oli poikkeava, koska sen saavuttaminen olisi vaatinut suuremman lämmönjohtavuuden 11–13 kelvinissä kuin esimerkiksi 15 K:ssä. Tämä olisi vaatinut yksikkökopeissa käytettyjen lämmönjohtavuuksien merkittävää muokkausta, mutta ne pyrittiin pitämään lähellä lähteistä saatuja arvoja. Tämä johti suureen prosentuaaliseen virheeseen ilman lämmittimen tehoa, mikä vaikutti myös eri käämien lämmönjohtavuuksien suhteeseen.

A- ja B-antureiden lämpötilojen mallinnettujen ja mitattujen erotuksien virheet (eli $(B - A) - (B_m - A_m)$, missä A ja B ovat antureiden ja mittauspisteiden lämpötilat ja indeksi m tarkoittaa mallia) on nähtävissä kuvassa 8.1 prosenttiosuutena lämmittimen tehon funktiona. Positiivinen virhe tarkoittaa että mallin antama lämmönjohtavuuden arvo on suhteellisesti (verrattuna mallin muihin arvoihin) liian suuri ja negatiivinen arvo tarkoittaa suhteellisesti liian pientä lämmönjohtavuutta.

Mittaustuloksia saatiin vain rajallisilta lämpötilaväleiltä, johtuen saatavilla olevasta jäähdystystehosta, eli mittauksissa ei saavutettu alle 10 K lämpötiloja. Toisaalta myös käämien todellinen haluttu toimintalämpötila on alle niobititaanin kriittisen lämpötilan 9,3 K (luultavasti noin 4,2 K), joten merkittävästi tätä korkeampien lämpötilojen ei nähty tuovan lisäarvoa lämmönjohtavuuksien tarkasteluun. Tämän takia myöskään mallin antamia tuloksia näiden rajojen ulkopuolella ei voida pitää luotettavina. Lämmönjohtavuuden tarkastelu rajattiinkin lämpötiloihin 12–25 K, pienimmän yhdelle käämille mitatun lämpötila-alueen mukaisesti ja toisaalta koska PET-eristetty käämi jäähdyi vain noin 12 K lämpötilaan, joten sen mallinnetut lämmönjohtavuudet alle 12 kelvinissä eivät ole luotettavia.



Kuva 8.1 A- ja B-antureiden mallista saatujen sekä mitattujen arvojen erotuksen virhe prosentteina mitatusta arvosta.

8.3 Pyörrevirtamallinnus

Alkuoletuksena oli, että pyörrevirtahäviöt pienenisivät eristeen paksuuden funktiona. Mallin antamat häviöt kuitenkin pienenisivät eristeen paksuuden ollessa alle 30 μm . Tämä voi johtua mallinnuksessa käytetyn korkean taajuuden aiheuttamasta virtojen alhaisesta tunkeutumissyvyydestä, koska myös tilanteessa, jossa johtimet olivat täysin kytkeytyneitä, saadut häviöt olivat selvästi pienemmät kuin kytkeytymättömässä tilanteessa (lähtöoletuksen vastaisesti).

Standardia tunkeutumissyvyyttä, eli syvyyttä jossa pyörrevirtojen tiheys on pienentynyt $e^{-1} \approx 37\%$ osaan, voidaan arvioida kaavalla [51]

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma_s}}. \quad (8.1)$$

Käyttäen luvussa 5.3 esitettyjä arvoja, kuparille kaavalla saatu tunkeutumissyvyys 63,8 MHz taajuudella on noin 8 μm , eli alle 1 % johtimen paksuudesta.

Mallin antamista tuloksista piirretyt kuvaajat eivät myöskään laskeneet täysin tasaisesti eristeen paksuuden funktiona, eli paksumpi eriste saattoi tuottaa suuremmat häviöt. Tämä johtuu todennäköisesti mallin yleisestä virheestä ja todellisessa tilanteessa käyrä laskeutuisi tasaisesti.

9. YHTEENVETO

Suprajohdemagneettien mekaaninen jäähditys mahdollistaisi kryostaattien toiminnan ilman nestemäisiä jäähditysnesteitä, kuten heliumia, jonka hinta on viime vuosina ollut nousussa lisääntyneen kysynnän johdosta. Kryojäähdyttimien toiminta vaatii vain sähköä kompressorille ja mahdollisesti vettä kompressorin jäähdytykseen. Toisaalta jäähdyttimet eivät ole kovin edullisia, joten ne vaativat kohtalaisen alkuinvestoinnin. Nestemäisessä jäähdityksessä kustannuksia tulee, kryostaatin alkutäytön lisäksi, kiehumishäviöistä. Tyypilliseen magneetikuvaukseen tarkoitettuun kryostaattiin lisätään heliumia noin 1–2 vuoden välein ja alkutäyttö sekä jäähditys voi vaatia tuhansia litroja eri jäähditysnesteitä. Käyttämällä kryojäähdytintä olisi mahdollista pienentää jäähdityksen kustannuksia, ainakin pitkällä aikavälillä.

Erilaisia kryojäähdyttimiä on monenlaisia, mutta yhteistä niille on toiminnan perustuminen joko regeneratiiviseen tai rekuperatiiviseen lämmönvaihtimeen. Regeneratiivisessa lämmönvaihtimessa kylmäpäähän menevä kaasu ja sieltä poistuva lämpimämpi kaasu kulevat lämmönvaihtimessa saman kanavan läpi. Tällöin lämmönvaihto tapahtuu huokoisen matriisimetallin avulla. Rekuperatiivisessa vaihtimessa kaasut kulkevat erillisiä kanavia pitkin, jolloin lämmönvaihto tapahtuu kanavien välillä olevan matriisimetallin kautta. Uusien hyvin lämpöä sitovien ja johtavien matriisimetallien ansiosta on pystytty kehittämään tehokkaammin toimivia ja pienempiä kryojäähdyttimiä. Nykyisin yleisimmin tarjolla olevat jäähdityntyytit ovat Grifford-McMahon, Stirling ja pulssiputki.

Magneettikuvauslaitteet ovat suprajohdemagneettien suurin kaupallinen sovelluskohde. Magneettikuvauslaitteiden toiminta perustuu vahvoihin magneettikenttiin, joita ei pystytä saavuttamaan tavanomaisilla kesto- ja sähkömagneeteilla. MRI-laitteen magneettiset osat koostuvat voimakkaasta päämagneetista (tyypillinen magneettivuon tiheys noin 1,5–3 T), gradienttikämeistä sekä RF-käämistä. Päämagneetti on kuvauslaitteen kallein osa, ja se on pääsääntöisesti suprajohdemagneetti. Päämagneetilla saadaan aikaan staattinen magneettikenttä kuvausalueelle. Gra-

dienttikäämit synnyttävät staattiseen kenttään gradientteja ja ne voivat olla joko kesto-, sähkö- tai suprajohdemagneetteja. RF-käämillä tuotetaan vahva radiotaajuinen pulssi, joka poikkeuttaa kuvausalueella olevat vetyatomit tietyn astemäärän (esimerkiksi 90° , eli $\pi/2$ pulssi), sekä havaitsee tämän seurauksena muutuuneen magnetisaation.

Jos kryostaatti on tarpeeksi hyvin eristetty, olisi mekaanisia jäädyttimiä mahdollista käyttää magneettikuvauslaitteiden magneettien jäädytykseen. Tällöin ei tarvitsisi käyttää kallista nestemäistä heliumia ja kryostaateista voitaisiin valmistaa pienempiä, koska nesteelle ei tarvita erillistä tilaa. MRI-laitteissa käytetyt suprajohdemagneetit on pääosin valmistettu niobitaanijohtimesta, mutta niissä olisi mahdollista käyttää myös korkean lämpötilan suprajohhteita, kuten magnesiumdiboridia.

Mekaanista jäädytystä on mahdollista käyttää ja käytetään monissa muissa sovelluskohteissa, kuten avaruusteknologiassa, infrapunasensoreiden jäädytyksessä, nestemäisen maakaasuun nesteytyksessä, jakelussa ja kuljetuksessa, elektroniikassa käytettyjen puolijohhteiden jäädytyksessä, joissakin lääketieteellisissä menetelmissä sekä kryopumpuissa. Suurin osa kryojäädyttimien kehityksestä onkin tapahtunut avaruussovelluksia varten.

Tässä työssä tutkittiin kolmea erilaisesta WIC-johtimesta valmistettua suprajohdekäämiä. Johtimien suprajohteena on niobititaania ja matriisimetallina on käytetty kuparia, jonka RRR-arvo on noin 100. WIC-johdin koostuu kanavasta jossa on uraan sijoitettu ydinlanka, ja suprajohde on filamentteina ydinlangan sisällä. Johtimissa on käytetty erilaisia eristeratkaisuja; käämin 1 kanavan ja ydinlangan ympärys on eristetty PET-sukalla, käämin 2 kanava on eristämätön ja käämissä 3 kanavan ja ydinlangan ympärys on päällystetty ohuella lakkaeristeellä. Käämeissä 2 ja 3 myös ydinlanka on eristetty kuparikanavasta Formvar-eristeellä. Magneettien ylä, ala- ja sisäpinnalla oli noin 1 cm paksuinen Stycast 2850 FT-epoksikerros.

Käämeille suoritettiin erilaisia jäähtymiseen ja lämmönjohtavuuteen liittyviä mittauksia, jotka toteutettiin kahdessa sarjassa. Ensimmäisessä sarjassa magneeteissa oli epoksikerros kylmälevyn ja käämiosan välissä ja toisessa sarjassa tämä epoksikerros poistettiin, mikä kasvatti magneettien kokonaislämmönjohtavuutta. Magneetit sijoitettiin tyjiöllä ja supereristeellä eristettyyn kryostaattiin. Jäädytys toteutettiin kryojäädyttimellä, jonka toisen vaiheen kylmäpää oli kiinnitettynä kylmälevyyn, johon myös magneetti kiinnitettiin. Käämeihin kiinnitettiin neljä lämpötila-anturia sekä lämmitin, jolla käämin keskiakselille voitiin tuoda eri määriä lämmitystehoa.

Testeissä mitattiin jäähtymisaika, eli kuinka kauan aikaa kului siihen, että magneetin lämpötila oli tasaantunut kylmimpään saavutettavaan lämpötilaan koejärjestyksessä, askelvaste 100 mW lämmittimen teholla, antureiden lämpötilat lämmittimen eri tehoilla, sekä magneetin lämpötila lyhyiden lämmittimen tehopulssien aikana.

Mittauksien tarkoituksena oli selvittää eri eristeratkaisuiden vaikutusta käämien eri suuntaisiin lämmönjohtavuuksiin λ . Lämmönjohtavuus on tärkeä ominaisuus jäähtymisen yhteydessä, koska suurempi λ mahdollistaa magneetin jäähtyttämisen kylmemmäksi samalla määrällä jäähdystehoja. Se voi myös tehdä magneetista stabiilimman, koska käämissä tai sen ympäristössä mahdollisesti syntyvä lämpö johtuu pois nopeammin ja lämpötila ei nouse yhtä paljon, verrattuna magneettiin jonka lämmönjohtavuus on pienempi.

Lämmönjohtavuutta arviottiin COMSOL-ohjelmalla tehtyjen mallien avulla. Malleissa arviottiin magneetin poikkileikkauksen yhden johtimen ja sitä ympäröivän eristeepoksikerroksen rakenne, mistä laskettiin arvio magneetin säteen ja pysty akselin suuntaisille lämmönjohtavuuksille. Nämä lämmönjohtavuudet siirrettiin koko magneetin kattavaan malliin, jonka lämpötiloja pyrittiin sovittamaan eri mittaustilanteissa esiintyneisiin lämpötiloihin. Malleilla mittaustuloksista arvioidut lämmönjohtavuudet testikäämeille on nähtävissä taulukossa 9.1.

Taulukko 9.1 Käämien lämmönjohtavuudet eri lämpötiloissa.

Lämpötila	$\lambda_{\text{ref,z}}$ (W/mK)			$\lambda_{\text{ref,r}}$ (W/mK)		
	1	2	3	1	2	3
12	0,63	6,1	3,9	0,28	2,6	2,1
18	0,67	8,0	6,6	0,32	3,3	2,9
24	0,71	9,6	8,4	0,35	4,0	3,5

Kuten nähdään, lämmönjohtavuudet käyttäytyvät odotusten mukaisesti, eli suurimman eristepaksuuden omaavan PET-meagneetin λ on huomattavasti pienempi kuin eristämättömän ja ohuesti eristetyn käämin. Myös eristämättömän ja lakkaeristetyn tapauksen välillä näyttää olevan kohtalainen ero, joten myös ohut eristekerros vaikuttaa lämmönjohtavuuteen.

Toisena työn tavoitteena oli selvittää, kuinka magneettikuvauslaitteen RF-käämin synnyttämät magneettikentät vaikuttavat suprajohtavaan pääkäämiin. Muuttuvat magneettikentät saavat aikaan pyörrevirtoja sähköä johtavissa aineissa, ja pyörrevirrat taas synnyttävät häviöitä resistiivisessä tilassa olevissa materiaaleissa, kuten

esimerkiksi suprajohteissa usein matriisimetallina käytetyssä kuparissa. Häviöt saavat aikaan lämpöä, joka on lähes aina ei-toivottua suprajohtemagneettien yhteydessä, koska siitä voi seurata quench, eli magneetin siirtyminen normaalitilaan. Quench keskeyttää magneetin toiminnan ja se voi myös rikkoa käämin. RF-käämin synnyttämien magneettikenttien tulee olla kohtuullisen suuria, jotta vaadittu vety-ytimien poikkeuttaminen onnistuu.

Pyörrevirtojen vaikutusta arvioitiin COMSOL-mallilla, joka koostui kahdesta päällekkäisestä johtimesta ja niiden ympärillä olevasta eristeestä. Kuten voitiin olettaa, pyörrevirtahäviöt pienenevät eristeen paksuuden kasvaessa. Kuitenkin alle $30\ \mu\text{m}$ eristeellä ei ollut havaittavaa vaikutusta häviöihin (mallin perusteella häviöt jopa pienenevät).

LÄHTEET

- [1] T. Anttila, “NbTi suprajohtodemagneettien stabiilisuus ja quench-analyysi,” Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2015.
- [2] Apiezon, “Apiezon N Grease: Cryogenic Silicone-Free High Vacuum Grease.” [Viitattu 2016-03-04]. [WWW]. Saatavissa: <http://www.apiezon.com/products/vacuum-greases/n-grease>
- [3] A. Apollonio, M. Koratzinos, M. Solfaroli Camillocci, A. Verweij, R. Schmidt, A. Siemko, S. Claudet, J. Steckert, H. Thiesen, and CERN Geneva Switzerland, “MEASUREMENT OF THE RESIDUAL RESISTIVITY RATIO OF THE BUS BARS COPPER STABILIZER OF THE 13 kA CIRCUITS OF THE LHC,” in *Proceedings of IPAC2012*, New Orleans, Louisiana, USA, 2012. [WWW]. Saatavissa: <http://199.190.250.75/prepress/THPPD031.PDF>
- [4] AZO Materials, “Superconducting Motors.” [Viitattu 2016-03-07]. [WWW]. Saatavissa: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=949>
- [5] J. H. Baik, “Design Methods in Active Valve Pulse Tube Refrigerator,” Dissertation, University of Wisconsin - Madison, 2003. [WWW]. Saatavissa: http://fs.magnet.fsu.edu/~lee/asc/pdf_papers/theses/jhb03phd.pdf
- [6] C. Barnes, “Cryopumping,” in *Proceedings of the 1968 Summer Study on Superconducting Devices and Accelerators*. Brookhaven National Laboratory: CVI Corporation, 1968, pp. 230–248. [WWW]. Saatavissa: <https://www.bnl.gov/magnets/Staff/gupta/Summer1968/0230.pdf>
- [7] O. Bíró, “Edge element formulations of eddy current problems,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 169, no. 3-4, pp. 391–405, feb 1999. [WWW]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782598001650>
- [8] B. L. Brandt, D. W. Liu, and L. G. Rubin, “Low temperature thermometry in high magnetic fields. VII. Cernox sensors to 32 T,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 70, no. 1, p. 104, jan 1999. [WWW]. Saatavissa: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/rsi/70/1/10.1063/1.1149549>

- [9] COMSOL, “COMSOL Multiphysics Modeling Software.” [Viitattu 2015-10-12]. [WWW]. Saatavissa: <https://www.comsol.com/>
- [10] —, *AC/DC Module User’s Guide*, 2013. [WWW]. Saatavissa: http://hpc.mtech.edu/comsol/pdf/ACDC_Module/ACDCModuleUsersGuide.pdf
- [11] Cryomech, “AL600 Cryorefrigerator Capacity Curve.” [Viitattu 2016-01-11]. [WWW]. Saatavissa: http://www.cryomech.com/capacitycurve/AL600_cc.pdf
- [12] —, “Cryorefrigerator Specification Sheet AL600 with CP1114.” [Viitattu 2015-09-25]. [WWW]. Saatavissa: http://www.cryomech.com/specificationsheet/AL600_ss.pdf
- [13] —, “Cryorefrigerator Specification Sheet PT415 with CP1110.” [Viitattu 2015-09-25]. [WWW]. Saatavissa: http://www.cryomech.com/specificationsheet/PT415_ss.pdf
- [14] —, “Model GB04 Cryogenic Refrigerator Operation and service manual.”
- [15] —. (2015, sep) Cryorefrigerators. [WWW]. Saatavissa: <http://www.cryomech.com/products/cryorefrigerators/>
- [16] A. de Waele, “Cryocoolers near their low-temperature limit,” *Cryogenics*, vol. 69, pp. 18–25, July 2015. [WWW]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011227515000272>
- [17] D. Dowsett, *Radiological Sciences Dictionary: Keywords, names and definitions*. CRC Press, 2009. [WWW]. Saatavissa: <https://books.google.com/books?id=K0gsC47cJdoC{&}pgis=1>
- [18] Eckels Engineering Inc., “Cryocomp Ver. 5.2 (2012).” [Viitattu 2015-10-22]. [WWW]. Saatavissa: <http://www.eckelsengineering.com/>
- [19] Electronics Tutorials, “RC Charging Circuit Tutorial & RC Time Constant.” [Viitattu 2016-01-28]. [WWW]. Saatavissa: http://www.electronics-tutorials.ws/rc/rc_1.html
- [20] A. Filis, N. Pundak, Y. Zur, R. Broyde, and M. Barak, “Cryocoolers for infrared missile warning systems,” in *SPIE Defense, Security, and Sensing*, B. F. Andresen, G. F. Fulop, and P. R. Norton, Eds. International Society for Optics and Photonics, apr 2010, pp. 76 602L–76 602L–9. [WWW]. Saatavissa: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1342565>

- [21] A. Fontell, *Tyhjiötekniikka*. Insinööritieto, 1986.
- [22] R. F. Giese, *Refrigeration Options for High-Temperature-Superconducting Devices Operating between 20 and 80 K for Use in the Electric Power Sector*, Argonne National Laboratory, 9700 South Cass Avenue, Argonne, Illinois 60439, oct 1994.
- [23] G. Grasso, “MgB₂ ten years afer: present state and perspectives for superconducting wires.” [Viitattu 2015-11-12]. [WWW]. Saatavissa: http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/grasso_presentation.pdf
- [24] E. Härö, “NbTi ja MgB₂ -suprajohteiden teknistaloudellinen vertailu MRI-laitteistossa,” Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2011.
- [25] I. Hiltunen, J. Jarvela, J. Lehtonen, R. Mikkonen, a. Stenvall, and J. Viljamaa, “Transverse Thermal Conductivity in an Epoxy Impregnated MgB₂ Coil,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 3, pp. 2407–2410, 2009.
- [26] R. Hobbie and B. Roth, “Magnetic resonance imaging,” in *Intermediate Physics for Medicine and Biology*. Springer New York, 2007, pp. 515–542. [WWW]. Saatavissa: http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-49885-0_18
- [27] M. Holm, “Industrial Manufacturing of Low Temperature Superconducting (LTS) wires,” 2011. [Viitattu 2016-03-08]. [WWW]. Saatavissa: <http://www.prizz.fi/sites/default/files/tiedostot/linkki2ID686.pdf>
- [28] J. P. Hornak, “The Basics of MRI.” [Viitattu 2015-10-05]. [WWW]. Saatavissa: <https://www.cis.rit.edu/htbooks/mri/inside.htm>
- [29] Infinity Physics, “MMP-LMHS Technology - Superconductors,” 2010. [Viitattu 2016-01-13]. [WWW]. Saatavissa: <http://www.infinityphysics.com/products/products-for-industry/lmhs/tech-development/mmp-lmhs-technology-superconductors/>
- [30] Y. Iwasa, *Case Studies in Superconducting Magnets*, 2nd ed. Springer US, 2009.
- [31] S. D. Jalal and S. T. Manji, “Preparation and Optimization of Poly(Vinyl Formal) from Poly(Vinyl Acetate) for Electrical Insulation,” *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, vol. 13, no. 6, p. 5, 2014. [WWW]. Saatavissa: <http://www.ijettjournal.org/volume-13/number-6/IJETT-V13P254.pdf>

- [32] Janis Research, “Cryocoolers available from Janis Research.” [Viitattu 2016-01-11]. [WWW]. Saatavissa: <http://www.janis.com/Products/Cryocoolers.aspx>
- [33] —, “Differences between pulse tube and Gifford-McMahon cryocoolers.” [Viitattu 2016-01-11]. [WWW]. Saatavissa: <http://www.janis.com/products/Cryocoolers/PulseTubeVsGifford-McMahonCryocoolers.aspx>
- [34] N. Jiang, U. Lindemann, F. Giebeler, and G. Thummes, “A ^3He pulse tube cooler operating down to 1.3 K,” *Cryogenics*, vol. 44, no. 11, pp. 809–816, nov 2004. [WWW]. Saatavissa: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-3242665109&partnerID=tZOtx3y1>
- [35] V. D. Kukin, “Maxwell equations.” [Viitattu 2015-11-24]. [WWW]. Saatavissa: https://www.encyclopediaofmath.org/index.php/Maxwell_equations
- [36] Lake Shore Cryotronics Inc., “Cernox | Overview | Lake Shore Cryotronics, Inc.” [Viitattu 2015-10-12]. [WWW]. Saatavissa: <http://www.lakeshore.com/products/cryogenic-temperature-sensors/cernox/models/pages/overview.aspx>
- [37] —, “Cernox Specifications.” [Viitattu 2016-01-19]. [WWW]. Saatavissa: <http://www.lakeshore.com/products/cryogenic-temperature-sensors/cernox/models/pages/Specifications.aspx{#}>
- [38] —, “Typical Cernox Resistance.” [Viitattu 2016-03-30]. [WWW]. Saatavissa: http://www.lakeshore.com/Documents/CX_RSDSsm.pdf
- [39] Y.-M. Lee, A. Haji-Sheikh, L. S. Fletcher, and G. P. Peterson, “Effective Thermal Conductivity in Multidimensional Bodies,” *Journal of Heat Transfer*, vol. 116, no. 1, p. 17, Feb. 1994. [WWW]. Saatavissa: <http://heattransfer.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1441567>
- [40] J. Lehtonen, R. Mikkonen, and J. Paasi, “Effective thermal conductivity in HTS coils,” *Cryogenics*, vol. 40, no. 4-5, pp. 245–249, Apr. 2000. [WWW]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011227500000308>
- [41] Luvata, “Superconductors for science, energy and healthcare.” [Viitattu 7.10.2015]. [WWW]. Saatavissa: http://www.luvata.com/Documents/SpecialProducts/Superconductors/LuvataSuperconductorsbrochure_US.pdf
- [42] B. T. Matthias, T. H. Geballe, S. Geller, and E. Corenzwit, “Superconductivity of Nb_3Sn ,” *Physical Review*, vol. 95, no. 6, pp. 1435–1435, sep 1954. [WWW]. Saatavissa: <http://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.95.1435>

- [43] R. Mikkonen, “DEE-54030 Kryogeniikka, luento 1.” [Viitattu 2015-09-29]. [WWW]. Saatavissa: <http://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/DEE-54030/Luento1.pdf>
- [44] —, “DEE-54030 Kryogeniikka Nesteytys ja kryojäähdyttimet,” WWW, luentokalvo. [Viitattu 2015-09-29]. [WWW]. Saatavissa: <http://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/DEE-54030>
- [45] —, *Kryogeniikka*, Tampereen teknillinen yliopisto, luentomoniste, 79 s.
- [46] —, “DEE-54000 Sähkömagneettisten järjestelmien lämmönsiirto,” 2013, luennot, viikko 44. [Viitattu 2016-01-22]. [WWW]. Saatavissa: https://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/DEE-54000/luennot2013/luennot_vko44.pdf
- [47] —, *DEE-54010 SUPRAJOHTAVUUS SÄHKÖVERKOSSA*, 2014, luentomoniste, 101 s. [WWW]. Saatavissa: https://www.tut.fi/smg/uudet_sivut/getF.php?fileId=218
- [48] —, “DEE-54011 Suprajohtavuus,” 2016, laskuharjoitukset: Suprajohdemagneetin suunnittelu. [Viitattu 2016-04-18]. [WWW]. Saatavissa: http://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/DEE-54011/harkat_{_}2016/h4.pdf
- [49] R. Motowidlo, L.R.Gregory, E.Haldar, P.Rice, J.A.Blaugher, “Critical currents and processing of wound coils of Ag-sheathed Bi-2223 high T_c tape: Microstructural and pinning effects,” *Applied Physics Letters*, vol. 59, no. 6, pp. 736–738, 1991.
- [50] National Physical Laboratory, “What do high vacuum and low vacuum mean? (FAQ - Pressure).” [Viitattu 2015-10-26]. [WWW]. Saatavissa: [http://www.npl.co.uk/reference/faqs/what-do-high-vacuum-and-low-vacuum-mean-\(faq-pressure\)](http://www.npl.co.uk/reference/faqs/what-do-high-vacuum-and-low-vacuum-mean-(faq-pressure))
- [51] NDT Resource Center, “Depth of Penetration & Current Density.” [Viitattu 2016-03-09]. [WWW]. Saatavissa: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Physics/depthcurrentdensity.htm>
- [52] J. Nerg, “BL20A0100 Terminen laitesuunnittelu,” luento 1. [Viitattu 2016-01-22]. [WWW]. Saatavissa: https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0100/luennot/luento_1.pdf

- [53] Next Big Future, “36.5 Megawatt superconducting motor Successfully Tested at Full Power.” [Viitattu 2016-03-07]. [WWW]. Saatavissa: <http://nextbigfuture.com/2009/01/365-megawatt-superconducting-motor.html>
- [54] T. Numazawa, O. Arai, A. Sato, S. Fujimoto, T. Oodo, Y. M. Rang, and T. Yanagitani, “New Regenerator Material for Sub-4 K Cryocoolers,” in *Cryocoolers 11 SE - 59*, R. G. Ross Jr., Ed. Springer US, 2002, pp. 465–473. [WWW]. Saatavissa: http://dx.doi.org/10.1007/0-306-47112-4_59
- [55] A. Oppelt, *Imaging Systems for Medical Diagnostics: Fundamentals, Technical Solutions and Applications for Systems Applying Ionizing Radiation, Nuclear Magnetic Resonance and Ultrasound.*, 2nd ed. Wiley-VCH, 2005.
- [56] Paramed Medical Systems, “MrOpen.” [Viitattu 6.10.2015]. [WWW]. Saatavissa: <http://www.paramedmedicalsistemas.com/showPage.php?template=mropen&id=1#>
- [57] —, “Slideshow MrOpen.” [Viitattu 2016-01-15]. [WWW]. Saatavissa: http://www.paramed.it/medical-systems/sarat-slideshow/slideshow_mropen_immagine_918801520.jpg
- [58] J. Pelegrín, G. Romano, E. Martínez, L. A. Angurel, R. Navarro, C. Ferdeghini, S. Brisigotti, G. Grasso, and D. Nardelli, “Experimental and numerical analysis of quench propagation on MgB 2 tapes and pancake coils,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 26, no. 4, p. 045002, Apr. 2013. [WWW]. Saatavissa: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-2048/26/4/045002>
- [59] R. Radebaugh, “Development of the Pulse Tube Refrigerator as an Efficient and Reliable Cryocooler,” 2000, submitted to: Proc. Institute of Refrigeration (London) 1999-2000. [WWW]. Saatavissa: http://cryogenics.nist.gov/Papers/Institute_of_Refrig.pdf
- [60] —, “Cryocoolers: the state of the art and recent developments.” *Journal of physics. Condensed matter : an Institute of Physics journal*, vol. 21, no. 16, p. 164219, apr 2009. [WWW]. Saatavissa: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-8984/21/16/164219>
- [61] T. Rantala, “55415 Kiintän aineen elektronirakenne,” 2005, luentomoniste. [Viitattu 2016-01-22]. [WWW]. Saatavissa: <http://butler.cc.tut.fi/~trantala/opetus/files/KOFE-55415.Kiintean.aineen.elektronirakenne/KOF-E.ss001-030.pdf>

- [62] P.-M. Robitaille and L. Berliner, *Ultra High Field Magnetic Resonance Imaging*, ser. Biological Magnetic Resonance. Boston, MA: Springer US, 2006, vol. 26. [WWW]. Saatavissa: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-0-387-49648-1>
- [63] J. W. Rohlf, *Wiley: Modern Physics from alpha to Z0 - James William Rohlf*, 1st ed. Wiley, 1994. [WWW]. Saatavissa: <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471572705.html>
- [64] N. Savage, “The World’s Most Powerful MRI Takes Shape - IEEE Spectrum.” [Viitattu 2015-10-05]. [WWW]. Saatavissa: <http://spectrum.ieee.org/biomedical/imaging/the-worlds-most-powerful-mri-takes-shape>
- [65] P. Seidel, *Applied Superconductivity: Handbook on Devices and Applications*. Wiley, 2015. [WWW]. Saatavissa: <https://books.google.com/books?id=PuhpBgAAQBAJ{&}pgis=1>
- [66] SHI Cryogenics Group, “CSA-71A Indoor Air-Cooled Compressor Series.” [Viitattu 2016-03-17]. [WWW]. Saatavissa: <http://www.shicryogenics.com/products/compressors/csa-71a-indoor-air-cooled-compressor-series/>
- [67] —, “Products - SHI Cryogenics Group.” [Viitattu 2015-10-12]. [WWW]. Saatavissa: <http://www.shicryogenics.com/products/>
- [68] —, “RDK-415D 4K Cryocooler Series.” [Viitattu 2016-03-17]. [WWW]. Saatavissa: <http://www.shicryogenics.com/products/4k-cryocoolers/rdk-415d-4k-cryocooler-series/>
- [69] —, “RDK-415D Cold Head Capacity Map (50 Hz).” [Viitattu 2016-03-17]. [WWW]. Saatavissa: http://www.shicryogenics.com/wp-content/uploads/2012/11/RDK-415D_Capacity_Map.pdf
- [70] T. R. Strobridge, “Cryogenic refrigerators: An updated survey,” National Bureau of Standards (U.S.), Tech. Rep. 655, 1974. [WWW]. Saatavissa: <https://archive.org/details/cryogenicrefrige655stro>
- [71] Sunpower, “Cryocoolers - Sunpower Inc.” [Viitattu 2016-01-11]. [WWW]. Saatavissa: <http://sunpowerinc.com/cryocoolers/>
- [72] University of Oxford, “Cryocoolers for space applications - Cryogenic Engineering Group.” [Viitattu 2015-11-12]. [WWW]. Saatavissa: <http://www.eng.ox.ac.uk/cryogenics/research/cryocoolers-for-space-applications>

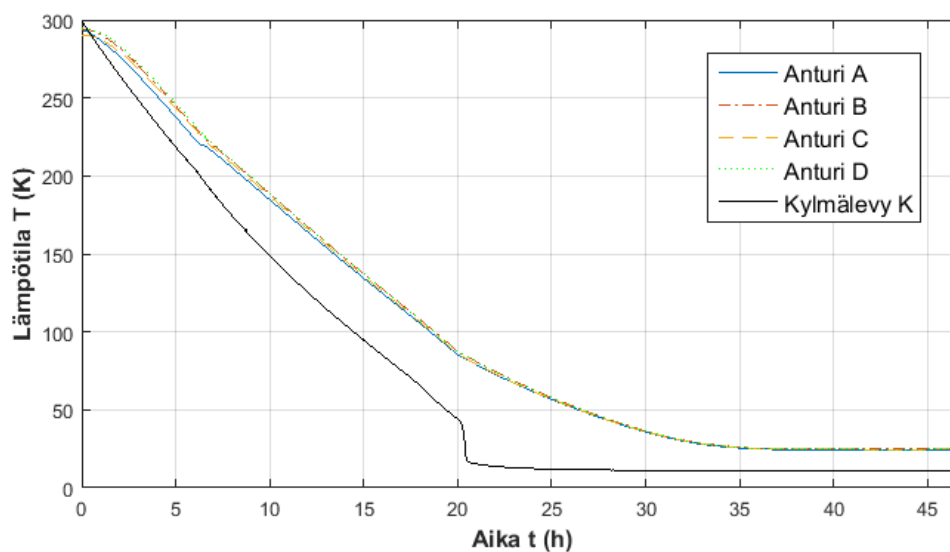
- [73] J. Upadhyaya, *University Physics-I*. Himalaya Publishing House, 2007.
- [74] D. Weishaupt, V. D. Köchli, and B. Marinček, *How Does MRI Work?* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. [WWW]. Saatavissa: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-540-37845-7>
- [75] Wolfram Research Inc, “Technical data for the element Helium in the Periodic Table.” [Viitattu 2016-03-04]. [WWW]. Saatavissa: <http://periodictable.com/Elements/002/data.html>
- [76] A. M. Wolsky, “Introduction to engineering & economic issues bearing on cryogenics for future power sector equipment incorporating ceramic superconductors,” ExCo of the IEA, Tech. Rep., 2001.

LIITE A. MITTAUSTULOKSET EPOKSIKERROKSEN KANSSA

Mittaustuloksista jotka saatiin käämin ja interfacen välissä olevan epoksin kanssa ei tehty ohjelmallista mallia. Tämä johtui epoksikerroksen hallitsevasta vaikutuksesta mittaustuloksiin.

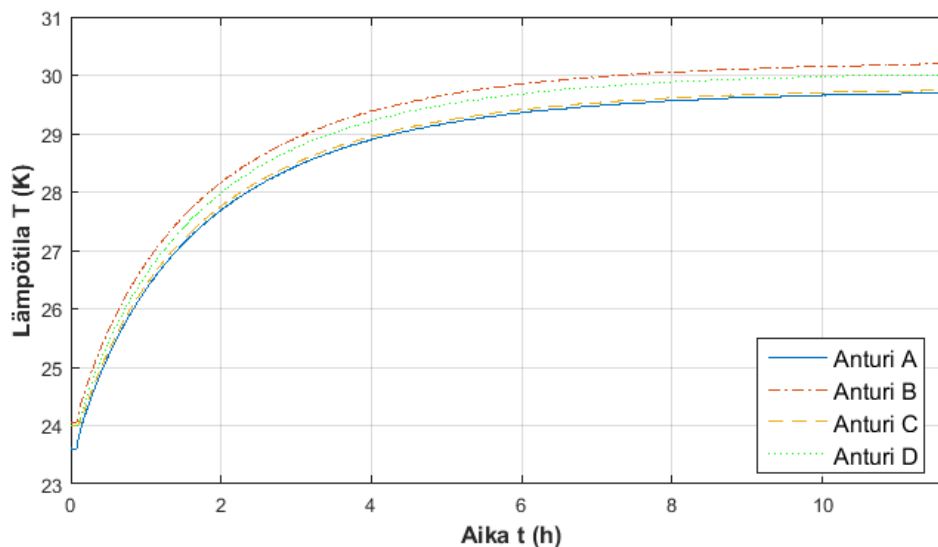
Käämi 1

Ensimmäiseksi jäähdytys ja mittaukset suoritettiin PET-eristetyille käämille. Kuvassa A.1 on eri sensoreiden lämpötilat ajan funktiona jäähdytyksen aikana. Käämi saavutti tasapainotilan alimmassa lämpötilassa 44,5 tunnin kuluttua jäähdytyksen aloittamisesta. Magneetti jäähdyi noin 25 K lämpötilaan ja jäähtymiseen lähelle tasapainolämpötilaa kului noin 40 tuntia.



Kuva A.1 Koemagneetin 1 antureiden lämpötilat jäähdytyksen aikana.

Seuraavaksi selvitettiin käämin niin sanottu askelvaste, eli mitattiin kuinka kauan käämin lämpötilan tasaantuminen kestää tietyllä tunnetulla lämmittimen teholla. Tämä tehtiin järjestelmän aikavakion selvittämiseksi PI-säädintä varten. Tehoksi valittiin 100 mW, ja mittauksen tulos on nähtävissä kuvassa A.2. Lämpötilojen tasaantumiseen kului noin 11,5 tuntia, anturin B näyttäessä arvoa 30,19 K.



Kuva A.2 Koemagneetin 1 askelwaste.

Tämän jälkeen magneettiin asennettuun lämmittimeen syötettiin erisuuruisia tehoja. Tehoa syötettiin siten, että anturin B lämpötila nousi 2 kelvinillä edellisestä arvosta. PI-säätimen ansiosta haluttu lämpötila saavutettiin hyvin nopeasti (verratuna 11,5 tuntiin 100 mW teholla ilman PI-säädintä), mutta käämin 1 tapauksessa kyseisiin mittauksiin kului kuitenkin noin 12 tuntia. Tehoa nostettiin viisi kertaa, eli lopuksi anturin B lämpötila oli noin 34,75 K.

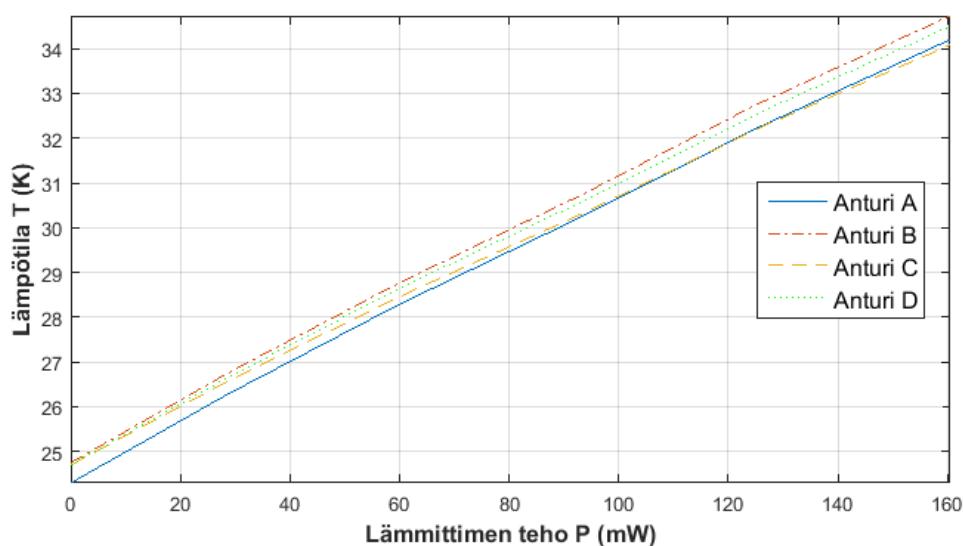
Mittauksen tarkoituksena oli selvittää, kuinka suuri teho tarvitaan nostamaan magneetin lämpötilaa tietyn määrän. Tätä tietoa käytettiin magneetin lämmönjohtavuuksien määrittämiseksi. Taulukossa A.1 on esitetty antureiden saavuttamat lämpötilat jäädytyksen lopussa tilanteen ollessa stabiloitunut, käytetyt lämmittimen tehot ja eri antureiden saavuttamat lämpötilat.

Kuvassa A.3 on käämin antureiden lämpötilat lämmittimen tehon funktiona lämmityksen aikana. Ilman ulkoista lämpökuormaa olisi koko magneetti jäähtynyt tasalämpöiseksi ja lämpötilaeroja olisi syntynyt vasta lämmityksen seurauksena. Lämpötila-gradientista magneetin ja kylmälevyn välillä ilman lämmitystehoa voidaan päätellä, että magneettiin tulee jonkin verran lämpöä säteilemällä kryostaatin ulkopuolelta. Tekemällä kuvasta A.3 sovite antureiden lämpötiloista kylmälevyn lämpötilaan, voidaan arvioida että magneettiin tulee noin 180–200 mW ulkoinen lämpökuorma.

Seuraavaksi lämmittimeen syötettiin erisuuruisia tehopulsseja. Käämille 1 tehopuls-

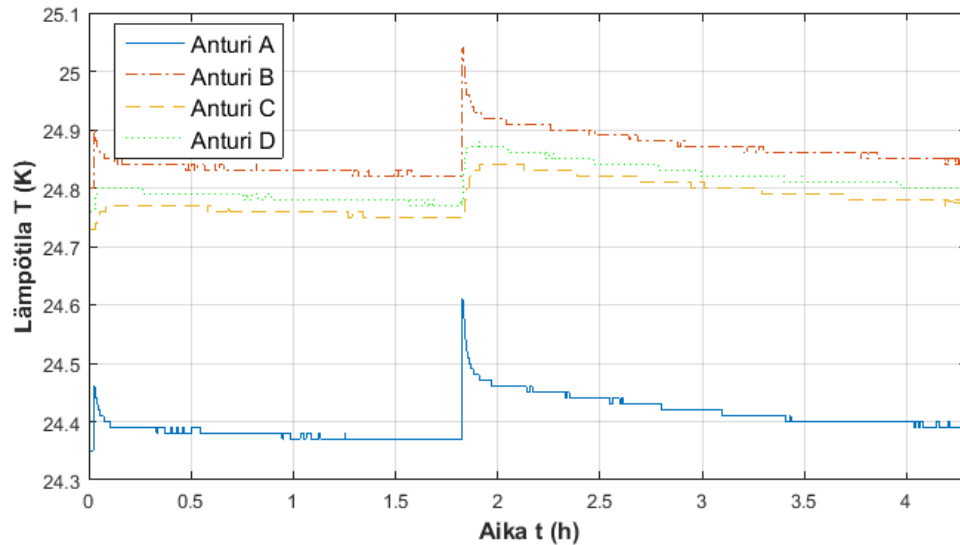
Taulukko A.1 Käytetyt lämmittimen tehot sekä käämin 1 antureiden lämpötilat eri tehoilla.

Lämmittimen teho (mW)	Tehon muutos (mW)	Antureiden lämpötilat (K)				
		A	B	C	D	K
0	0	24,30	24,75	24,70	24,71	11,0
28,6	28,6	26,28	26,75	26,57	26,65	11,1
59,7	31,0	28,27	28,75	28,44	28,63	11,2
93,7	34,0	30,27	30,76	30,33	30,60	11,2
125,2	31,5	32,22	32,75	32,20	32,54	11,2
160,5	35,3	34,20	34,73	34,08	34,50	11,3

**Kuva A.3** Koemagneetin 1 antureiden lämpötilat lämmittimen tehon funktiona.

seja syötettiin kolme, mutta yhden mittausta epäonnistui, joten tuloksia saatiin vain noin 5 ja 10 joulen tehospulsseista. Lämmittimelle syötettiin ensin 0,5 W teho 10 sekunnin ajan, samalla mitaten antureiden lämpötiloja. Tämän jälkeen odotettiin että käämin lämpötila palaa alkutilaansa, jonka jälkeen lämmittimeen syötettiin 1 W teho 10 sekunnin ajan. Koska lämmitintä käytettiin manuaalisesti, pulssien todelliset energiat olivat 4,36 J ja 9,35 J. Kuvassa A.4 on lämmittimen lämpöpulssien aiheuttamat muutokset käämin lämpötilassa.

Tuloksista nähdään että jokaista lämmittimen tuottamaa 5 J energiaa kohden, nousee lämmitintä lähimpänä olevien antureiden A ja B lämpötila noin 0,1 K. Antureiden C ja D lämpötilan nousu on noin puolet tästä ja muutos näkyy niissä viiveellä, koska



Kuva A.4 Koemagneetin 1 antureiden lämpötilat lämpöpulssien aikana.

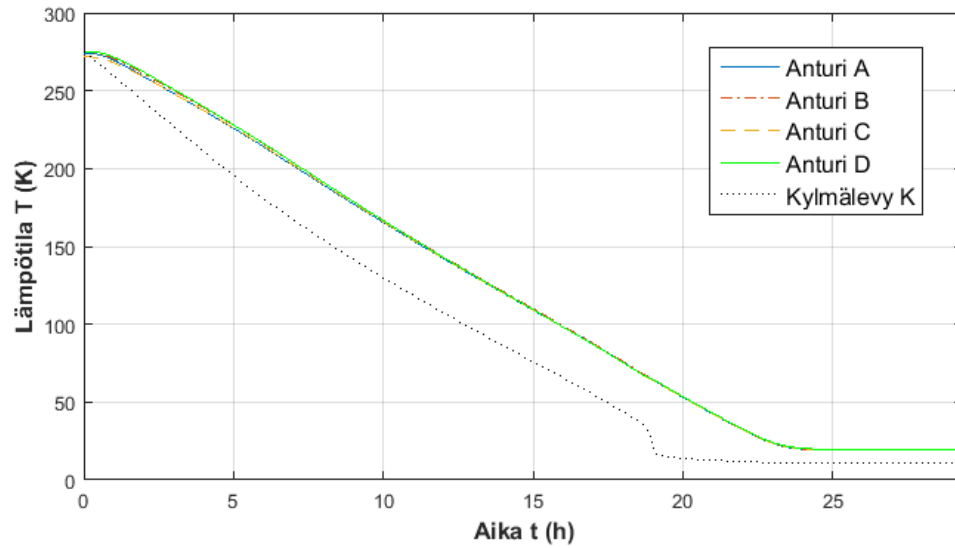
ne sijaitsevat kauempana lämmittimestä. Tilanne tasaantui takaisin tasapainotilaansa 5 J pulssin jälkeen noin 1,8 tunnissa, mutta 10 J pulssin jälkeen tasaantumiseen kului jo yli 2 tuntia.

Käämi 2

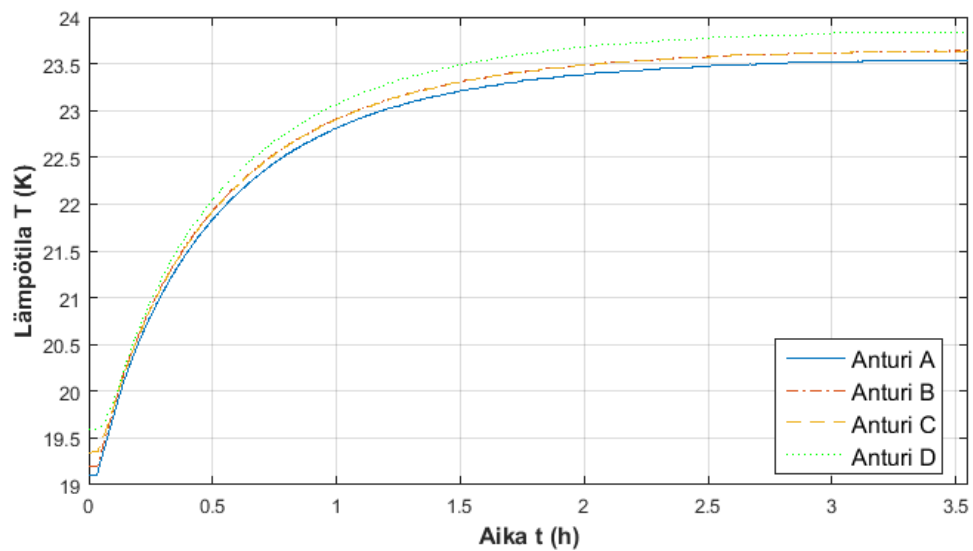
Käämille 2 toistettiin samat mittaukset kuin edellä. Käämissä 2 ei ole lainkaan eristystä kuparikanavien ympärillä, joten sen lämmönjohtavuus on oletetusti paras mitatuista magneeteista. Kuvassa A.5 on käämin 2 antureiden lämpötilat jäähtymisen aikana. Tasapainotila alimmassa lämpötilassa saavutettiin 26,5 tuntia jäähtymisen aloittamisesta. Magneetti jäähdyi lähelle 19 K lämpötilaa, eli noin 6 K kylmemmäksi kuin käämi 1 ja jäähtymiseen lähelle tasapainotilaa meni hieman yli 25 tuntia.

Kuvassa A.6 on askelvastekokeen tulos käämille 2. Lämmittimen tehona käytettiin jälleen 100 mW:a, ja käämin lämpötilat tasaantuivat noin 3,4 tunnissa anturin B näyttäessä lämpötilaa 23,63 K.

Käämille 2 lämmitysmittaus toistettiin seitsemän kertaa, jälleen 34,75 kelviniin asti. Kun mahdollista, lämpötilaväleiksi valittiin samat kuin käämille 1, jotta tuloksia olisi helpompi vertailla. Taulukossa A.2 on käämin 2 antureiden saavuttamat lämpötilat tasapainotilassa jäähtymisen lopussa, lämpötilat lämmityksen aikana, sekä



Kuva A.5 Koemagneetin 2 antureiden lämpötilat jäähdytyksen aikana.



Kuva A.6 Koemagneetin 2 antureiden lämpötilat askelvastekokeessa.

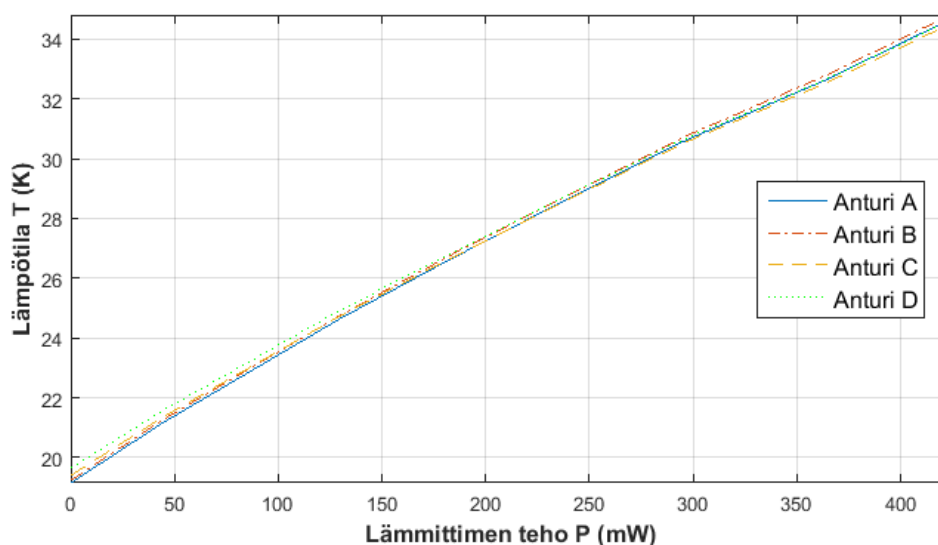
lämmittimen tehot ja tehojen lisäys eri lämpötilojen välillä.

Kuvassa A.7 on käämin 2 antureiden lämpötilat lämmittimen tehon funktiona. Ulkoinen lämpökuorma olisi soviteen mukaan noin 180–200 mW. Kuvassa A.7 olevat suorat eivät ole täysin lineaarisia, mutta tulos on hyvin saman suuntainen kuin käämin 1 tapauksessa. Toisaalta myös käämin 2 dimensiot ovat pienemmät kuin käämin

Taulukko A.2 Käytetyt lämmittimen tehot sekä käämin 2 antureiden lämpötilat eri tehoilla.

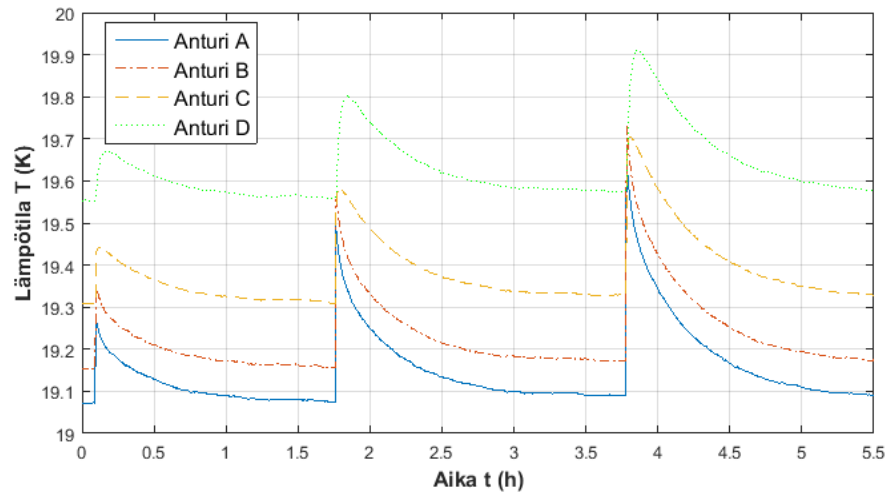
Lämmittimen teho (mW)	Tehon muutos (mW)	Antureiden lämpötilat (K)				
		A	B	C	D	K
0	0	19,16	19,24	19,40	19,65	10,8
44,7	44,7	21,18	21,28	21,37	21,59	10,8
129,5	84,8	24,64	24,75	24,73	24,92	10,9
182,5	52,9	26,62	26,75	26,65	26,81	11,0
238,5	56,1	28,62	28,75	28,59	28,75	11,0
296,3	57,7	30,61	30,75	30,55	30,68	11,1
363,4	67,1	32,62	32,77	32,51	32,63	11,1
423,8	60,5	34,66	34,81	34,51	34,62	11,2

1, joten siinä on hieman vähemmän säteilyä vastaanottavaa pinta-alaa.

**Kuva A.7** Koemagneetin 2 antureiden lämpötilat lämmittimen tehon funktiona.

Käämille 2 syötettiin 3 lämpöpulssia joiden energiat olivat 4,97, 10,23 ja 14,25 J. Kuvassa A.8 on antureiden mittaamat arvot lämpöpulssien aikana.

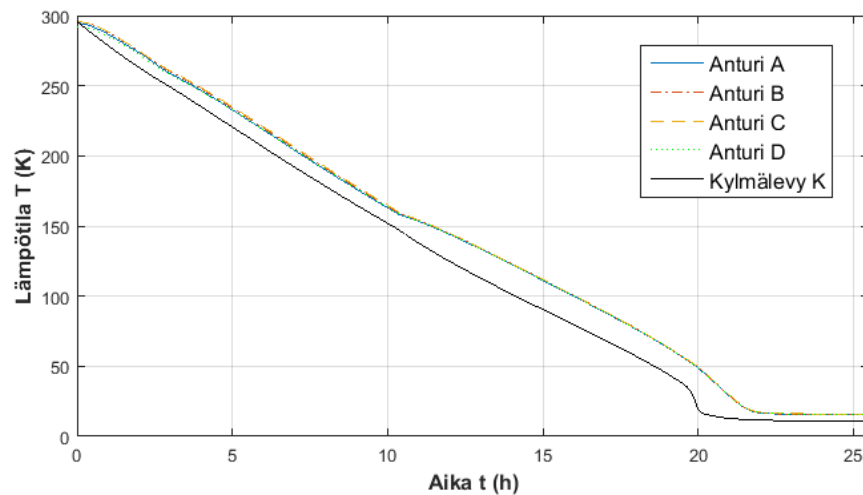
Antureiden A ja B lämpötilat nousivat noin 0,2 kelviniä jokaista 5 joulea kohden. Nousu antureissa C ja D oli jälleen lähes puolet pienempi. Anturi D reagoi hitaiten, mikä on järkevää koska se on kauimpana lämmittimestä. Lämpötilat palautuivat takaisin tasapainotilaansa noin 1,5 tunnissa, eikä pulssin energialla ollut aikaan juurikaan vaikutusta.



Kuva A.8 Koemagneetin 2 antureiden lämpötilat lämpöpulssien aikana.

Käämi 3

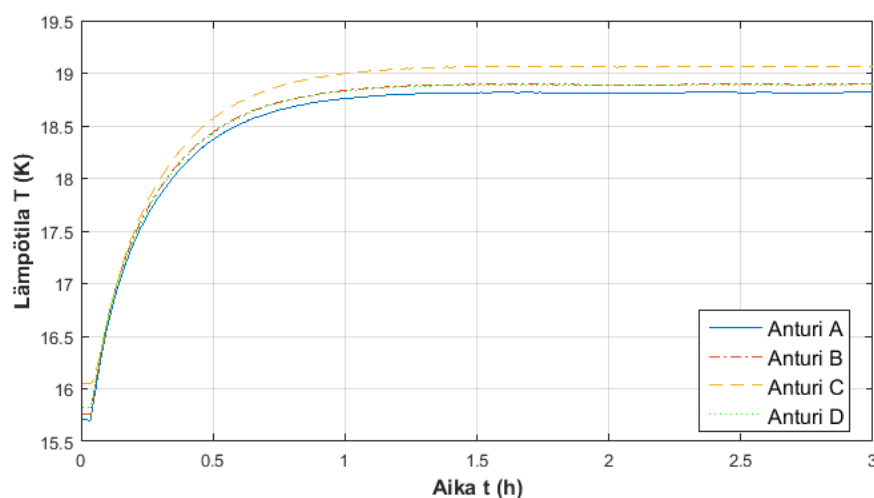
Myös käämille 3 toistettiin edellisen kaltaiset mittaukset. Käämissä 3 johtimen ympärillä oli ohut lakkakerros, joka mahdollisesti vaikuttaa lämmönjohtavuuteen. Kuvassa A.9 on esitetty antureiden lämpötilat jäähtymisen aikana, jotka tasaantuivat alimpaan arvoonsa noin 24,5 tunnin kulutta jäähtymisen aloittamisesta ja käämin lämpötila oli noin 16 K.



Kuva A.9 Koemagneetin 3 antureiden lämpötilat jäähtymisen aikana.

Kuvassa A.10 on käämin 3 antureiden lämpötilat askelvastekokeen aikana. Lämmit-

timen tehona käytettiin jälleen 100 mW ja lämpötilat tasaantuivat noin 2,5 tunnin kuluessa.



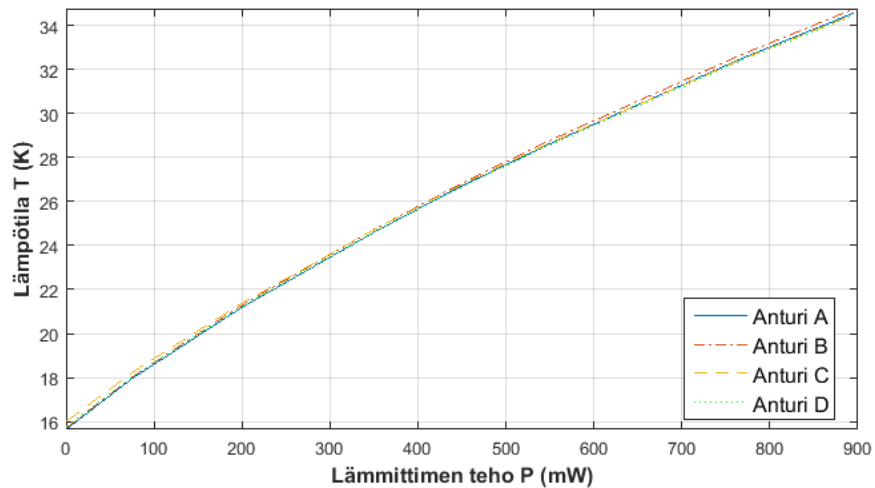
Kuva A.10 Koemagneetin 3 antureiden lämpötilat askelvastekokeessa.

Seuraavaksi käämiä lämmitettiin tasaisilla tehoaskelilla. Ensimmäiseksi PI-säätimen asetusarvona käytettiin 18,0 K:iä ja 24,75 kelvinistä alkaen lämmitys suoritettiin jälleen 2 K välein. Taulukossa A.3 on käämin 3 antureiden alimmat lämpötilat sekä lämpötilat lämmityksen aikana.

Taulukko A.3 Käytetyt lämmittimen tehot sekä käämin 3 antureiden lämpötilat eri tehoilla.

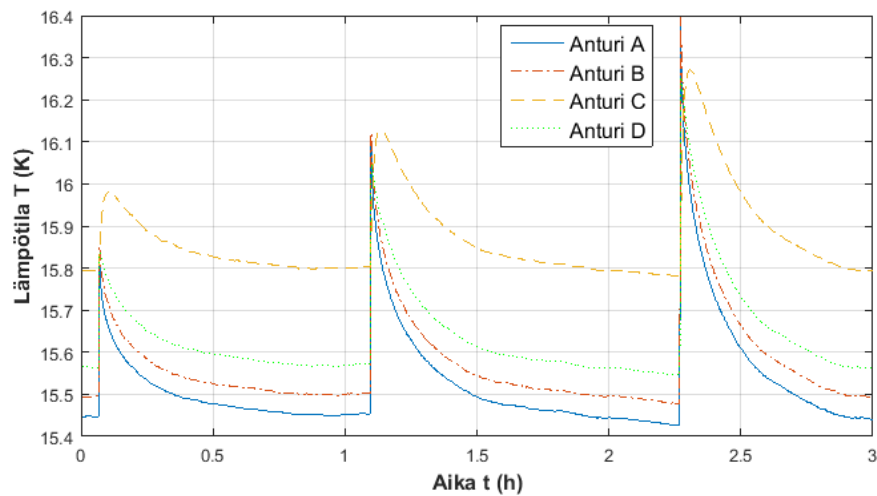
Lämmittimen teho (mW)	Tehon muutos (mW)	Antureiden lämpötilat (K)				
		A	B	C	D	K
0	0	15,64	15,69	16,0	15,77	10,76
75,7	75,7	17,97	18,04	18,24	18,05	10,88
198,7	123,0	21,16	21,26	21,35	21,20	10,95
351,1	152,4	24,63	24,75	24,74	24,63	11,18
443,9	92,8	26,59	26,72	26,66	26,56	11,29
548,1	104,2	28,60	28,75	28,63	28,54	11,39
662,1	114,0	30,62	30,79	30,62	30,55	11,42
771,5	109,5	32,57	32,75	32,53	32,48	11,56
896,2	124,7	34,59	34,78	34,53	34,48	11,71

Kuvassa A.11 on antureiden lämpötilat tehon funktiona lämmityksen aikana. Sovitteella arvioiden tulee käämiin 3 noin 175–180 mW ulkoista lämpökuormaa.



Kuva A.11 Koemagneetin 3 antureiden lämpötilat lämmittimen tehon funktiona.

Kuvassa A.12 on käänin 3 antureiden lämpötilat lämmittimelle syötettyjen pulssien aikana. Lämmittimelle syötettyjen pulssien energiat olivat 5,12, 9,11 ja 13,93 J.



Kuva A.12 Koemagneetin 3 antureiden lämpötilat lämpöpulssien aikana.

Anturin B lämpötila nousi noin 0,3 K jokaista 5 joulea kohden ja tilanteen tasaantumiseen takaisin tasapainotilaansa kesti noin 1 tunti. Pulssin energia ei tässäkään tapauksessa vaikuttanut tasaantumisaikaan paljoakaan.