



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TOMI ANTTILA
NBTI SUPRAJOHDEMAGNEETTIIEN STABIILISUUS JA QUENCH-
ANALYYSI

Diplomityö

Tarkastaja: lehtori Risto Mikkonen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 3. kesäkuu-
ta 2015

TIIVISTELMÄ

TOMI ANTTILA: NbTi supraohdemagneettien stabiilisuus ja quench-analyysi
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 76 sivua, 8 liitesivua
Heinäkuu 2015
Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Vaihtoehtoiset sähköenergiateknologiat
Tarkastaja: Lehtori Risto Mikkonen

Avainsanat: Suprajohtavuus, niobititaani, kanavajohdin, stabiilisuus, quench

Matalan lämpötilan suprajohteita (LTS) on kehitetty 60-luvulta saakka. Tyypillisesti niillä toteutetuissa sovelluksissa jäähdytykseen käytetään nesteheliumia. Nestehelium on kuitenkin merkittävä taloudellinen tekijä, sen käsittely on hankalaa ja saatavuus voi olla vaikeaa. Tämän vuoksi kryojäähdyttimien käyttö LTS-sovelluksissa on houkuttelevaa. Perinteisten suprajohdinten ja magneettien rakenteiden vuoksi kryojäähdyttimillä toteutettu jäähdytys on hidasta pienen jäähdytystehon ja käämin sisäisen lämmönjohtavuuden vuoksi. Jäähdytystä pyritään nopeuttamaan parantamalla käämien sisäistä lämmönjohtavuutta erilaisten johdinrakenteiden avulla.

Tämän työn tarkoitus oli selvittää Luvata Oy:n patentoiman kanavajohtimen ominaisuuksia. Johdin poikkeaa markkinoilla olevista kanavajohtimista siten, että siinä ydinlangan ja kuparikanavan välillä on sähköinen eristys. Johtimesta käytettiin kahta eri variaatiota. Toisessa kuparikanavan ulkopinta oli täysin paljas (käämi 1), ja toisessa sen päällä oli ohut eristelakkakerros (käämi 2). Lisäksi tarkasteltiin perinteisempää kolmatta kanavajohdintyyppiä, jossa ydinlankaa ei ollut eristetty kuparikanavasta, mutta johtimen ympärillä oli kerros PET-eristettä (käämi 3).

Työssä esitettiin yksinkertainen solenoidimagneetin quench-analyysin malli. Mallia hyödynnettiin mittausohjelman suunnittelussa ja sen antamia tuloksia verrattiin mittaus-tuloksiin. Käämeille suoritettiin kriittisen virran mittaukset, virran kasvatusnopeuden testit sekä määritettiin MQE-arvot eri virtojen arvoilla.

Mittaustulokset poikkesivat esitetystä mallista, mutta käyttäjän kannalta edulliseen ja turvalliseen suuntaan. Käämeillä päästiin erittäin lähelle *short sample*-mittausten mukaisia virtoja, ja niissä ei esiintynyt heikentymistä eikä *training*-ilmiötä. Tämän perusteella johdin oli siis erittäin sopivaa käämien valmistukseen.

Käämien 1 ja 2 lämpötila palautui korkeimmastakin lämpötilasta takaisin nesteheliumin lämpötilaan alle 30 sekunnissa, kun taas käämillä 3 siihen kului noin 10-kertainen aika. Heliumkylvyssä jäähtymisnopeudessa ei näkynyt merkittävää eroa käämien 1 ja 2 välillä.

Käämin virran ollessa 95 % kriittisestä virrasta käämien 1 ja 2 MQE-arvot olivat 120 mJ ja 95 mJ. Virran muuttuessa käämissä 2 muodostuneiden pyörrevirtojen aiheuttama lämpötilan nousu oli pienimmillään vain noin 1 % ja suurimmillaan noin 45 % käämin 1 arvosta. Suurin etu saatiin matalilla virran kasvatusnopeuksilla. Lakkakerros kuparikanavan päällä heikentää siis stabiilisuutta noin 20 %, mutta parhaimmillaan käytännössä eliminoi pyörrevirtojen aiheuttaman lämpötilan nousun.

ABSTRACT

TOMI ANTTILA: Stability and quench analysis of NbTi superconductor magnets
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 76 pages, 8 Appendix pages
July 2015
Master's Degree Programme in Electrical Engineering
Major: Alternative electric energy technologies
Examiner: Lecturer Risto Mikkonen

Keywords: Superconductivity, NbTi, wire-in-channel, stability, quench

Low temperature superconductors (LTS) have been developed since the 60s. Conventionally those applications are cooled using liquid helium. However, liquid helium is a considerable economical factor, it is difficult to handle and its availability may be uncertain. That is why using cryocoolers in LTS applications is an inviting prospect. Typically, cooling to 4,2 K with cryocoolers takes a long time due to low cooling power and limited coil thermal conductivity. Different conductor designs are developed to increase the coils internal thermal conductivity and reduce the cooling time.

The purpose of this thesis was to investigate the properties of a wire-in-channel conductor type patented by Luvata Oy. Wire-in-channel conductors consist of a composite superconductor embedded in an open copper channel. The conductor in question differs from other wire-in-channel conductors on the market by the electrical insulation between the wire and the channel. Two variations of the conductor were used. One had no electrical insulation on the copper channel (coil 1) and the other had a thin layer of varnish (coil 2). A third type was used for comparison, where there was no insulation between the wire and the channel, but the entire conductor was PET-insulated (coil 3).

A simple model for quench analysis was also presented in the thesis. It was used for planning the parameters for the magnet measurements as well as providing a point of comparison for the results. The tests included measurements for the coil critical current, the eddy currents caused by the current ramp and the MQE for various coil currents.

The measurement results differed from the model, but towards the beneficial direction from the designer point of view. The achieved critical currents were extremely close to the conductor short sample values. The coils also exhibited no training nor degradation. This implies that the conductor was very suitable for manufacturing magnets.

Coils 1 and 2 returned back to the 4,2 K from the highest quench temperature in less than 30 seconds, whereas coil 3 took about ten times as long. There was no significant difference in the cooling times between coils 1 and 2 in the case of a helium bath cooling.

With a coil current that is 95 % of the critical current the MQE for coils 1 and 2 were 120 mJ and 95 mJ, respectively. The temperature rise caused by eddy currents in the copper channels in coil 2 was at minimum only 1 % and at most about 45 % compared to coil 1. The largest benefit was reached when the current ramp rate was the lowest. In other words, the varnish layer on the copper channel reduces the MQE about 20 % at worst, but practically eliminates the temperature rise caused by eddy currents.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston Sähkötekniikan laitoksella ja yhteistyössä Luvata Oy:n kanssa. Haluan kiittää Risto Mikkosta työn ohjaamisesta, tarkastamisesta sekä opintojen aikana innostavasta luennoinnista. Haluan kiittää myös yhteyshenkilönä toiminutta ja tämän diplomityön aiheen mahdollistanutta Jukka Somerkoskea, sekä muuta Luvata Oy:n väkeä, jotka osallistuivat työhön liittyviin järjestelyihin. Erityisen suuri kiitos kuuluu myös Joonas Järvelälle, jonka korvaamattoman osaamisen ansiosta diplomityön käytännön osuus saatiin suoritettua määrätietoisesti ja täysin vailla katastrofeja.

Opintojeni aikana suprajohtavuusilmiöstä muodostui minua erittäin paljon kiehtova aihe, minkä vuoksi siihen liittyvä diplomityön aihe takasi innostuksen työn tekemiseen. Matalan lämpötilan suprajohdesovelluksiin liittyvät käytännön mittaukset lienevät myös opiskelijoille harvinaista herkkua, mitä en ole varmasti unohtanut mainita kenellekään diplomityöstäni kysyneelle tuttavalle tai sukulaiselle.

Lopuksi haluan tietenkin kiittää perhettäni tuesta ja kannustuksesta. Kovintakin stressiä niin muiden opintojen kuin diplomityönkin aikana helpottivat jo pelkät yhdessä vietetyt viikonloput. Erityisesti kiitän vanhempiani, jotka ovat kannustaneet ja tukeneet minua kaikin puolin läpi koko elämäni.

Tampereella 28.7.2015

Tomi Anttila

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	SUPRAJOHTAVAN TILAN LUONNE	2
2.1	Suprajohteen kriittiset suureet ja luokittelu.....	2
2.2	Komposiittijohtimen rakenne	4
2.2.1	Kaupalliset suprajohteet	5
2.3	Suprajohteen häiriöt ja lämmön synty	7
2.3.1	Jatkuvat häiriöt.....	8
2.3.2	Transientit häiriöt.....	10
2.4	”Degradation”- ja <i>training</i> - ilmiöt.....	11
2.5	Suprajohteen stabiilisuus.....	11
2.6	Stabiilisuuskriteerit MPZ ja MQE.....	12
3.	QUENCH- TAPAHTUMA	14
3.1	Suprajohtimen ominaisuudet ja quenchin synty.....	14
3.1.1	Ominaislämpökapasiteetti	14
3.1.2	Resistiivisyys	16
3.1.3	Lämmönjohtavuus.....	17
3.2	Quench- parametrit	18
3.2.1	Normaalialueen etenemisnopeus	18
3.2.2	Virran vaimeneminen ja vaimenemisaika	20
3.2.3	Maksimijännite	22
3.2.4	Hot spot- lämpötila	24
3.3	Suprajohdekäämin suojaus.....	25
3.3.1	Suojausvastus.....	25
3.3.2	Induktiivinen toisiokäämi.....	26
3.3.3	Käämin jako osakomponentteihin	26
3.3.4	Suojauslämmitin	27
4.	SOLENOIDIMAGNEETIN QUENCH- ANALYYSI	28
4.1	”Wire-in-channel”- johtimet	28
4.1.1	Optio 1 – Eristämätön johdin.....	29
4.1.2	Optio 2 – Päälystetty johdin	29
4.1.3	Optio 3 – PET-eristetty johdin.....	29
4.2	Koemagneetin rakenne.....	29
4.3	Käämien virrat	31
4.3.1	Virtamarginaalit	32
4.3.2	Vakioenergia.....	33
4.3.3	Vakio magneettivuon tiheys	33
4.4	Approksimaatio yhtälöillä.....	33
4.4.1	Käämin 1 analyysi.....	36
4.4.2	Käämin 2 analyysi.....	39

4.4.3	Käämin 3 analyysi.....	41
4.5	Simulointi MIIT mallilla.....	43
5.	KOEJÄRJESTELYT.....	48
5.1	Magneettien valmistus	48
5.2	Käämien mittausanturit.....	49
5.3	Mittausohjelma.....	52
5.3.1	MQE- arvon määrittäminen.....	52
5.3.2	Virtamarginaalit	52
5.3.3	Vakio magneettivuon tiheys, energia ja virta	53
5.3.4	Kriittinen virta ja virran nopea kasvattaminen	53
5.3.5	Käämin resistanssi lämpötilan funktiona	54
5.4	Mittauskytkentä	54
6.	MITTAUSTULOKSET.....	56
6.1	MQE- mittauksen tulokset	56
6.1.1	MQE- tulosten vertailu.....	57
6.2	Kriittiset virrat	58
6.3	Virran <i>ramp</i> - nopeus testit	59
6.4	Virran vaimeneminen	60
6.5	Maksimijännite	63
6.6	Lämpötilan nousu	64
6.7	Lämpötilan palautuminen ja jäähtyminen.....	68
6.8	NZP- nopeuden määrittäminen	68
6.9	Lämmönjohtavuuden laskettu arvo	71
7.	YHTEENVETO.....	73
	LÄHTEET.....	77

LIITE A: MQE- MITTAUSTEN TULOKSET

LIITE B: QUENCHIN AIKAINEN VIRRAN VAIMENEMINEN

LIITE C: MITTAUKSISTA MÄÄRITETYT NORMAALIALUEEN ETENEMISNOPEUDET

LIITE D: JOHTIMEN PITUUSSUUNTAINEN LÄMMÖNJOHTAVUUS

KUVALUETTELO

Kuva 2.1: Erään kaupallisen niobititaani-suprajohteen kriittinen pinta. [2, s. 2].....	3
Kuva 2.2: Suhteellisen sähkökentän suuruus suhteellisen virrantiheyden funktiona n -arvoilla 5, 20 ja 80.	4
Kuva 2.3: Luvata Oy:n valmistaman 54-säikeisen suprajohtimen poikkileikkaus. Tummat alueet ovat suprajohdetta, jota ympäröi kuparinen matriisimetalli. [4].....	5
Kuva 2.4: SuperPower Inc. yrityksen valmistaman YBCO-johtimen rakenne. Suprajohteen, stabiloivan kuparikerroksen ja suojaavan hopeakerrosten lisäksi johteessa on kasvualusta eli substraatti sekä puskurikerros. [11].....	6
Kuva 2.5: Vuonhyppyyn johtavan ketjureaktion kaaviokuva. [2, s. 133.].....	10
Kuva 2.6: MPZ ellipsoidia havainnollistava kuva.	13
Kuva 3.1: Kuparin ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona [8].....	15
Kuva 3.2: Niobititaanin ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona [8].....	15
Kuva 3.3: Kuparin resistiivisyys RRR-arvoilla 100, 50 ja 20 ilman ulkoista magneettikenttää.....	17
Kuva 3.4: Kuparin lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona RRR arvoilla 20, 50 ja 100. [8]	18
Kuva 3.5: Normaalialueen eteneminen sen kohdattua rajoitus yhdessä (kohta 1) ja kahdessa (kohta 2) ulottuvuudessa. Vasemmanpuoleisessa kohdassa 1 normaalialue on rajoitettu z -akselin suunnassa eli tasoon ja siitä pois päin. Oikeanpuoleisessa kohdassa 2 normaalialue on rajoitettu lisäksi x -akselin suunnassa, jolloin se etenee y -akselin suuntaisen poikkileikkauksen muotoisena tasona.	21
Kuva 3.6: Quench- jännitteen muodostumista kuvaava käyrämuoto ja sijaiskytkentä. [2, s. 203].....	23
Kuva 3.7: Esimerkkikytkentä suojausvastuksella R_e suojatusta käämistä. Katkaisija S avataan jos käämissä havaitaan resistanssia, jolloin virta kulkee vastuksen R_e läpi.	25
Kuva 3.8: Kahteen osaan jaetun magneetin sähköistä kytkentää havainnollistava kuva. Käämin 1 resistanssin $r(t)$ kasvaessa virta I_1 vaimenee ja (I_2-I_1) kasvaa.	26
Kuva 3.9: Yksi mahdollinen suojauslämmittimen kytkentä.....	27
Kuva 4.1: Poikkileikkaus työssä käytetystä Luvata Oy:n valmistamasta WIC-johtimesta. Kuvan johtimen dimensiot ovat 1,972 mm x 1,169 mm, ja ydinlangan halkaisija on 0,65 mm. [4].....	28
Kuva 4.2: Solenoidimagneetin mittoja a , b ja l , poikkipinta-alaa A sekä magneettivuon tiheyksien B_w ja B_0 sijaintia havainnollistava kuva.	30

Kuva 4.3: Virtamarginaalin määrittämiseen käytetty menetelmä. Kuvassa on esitetty skaalattu ja skaalaamaton kriittisen virran kuvaaja sekä käämin kuormituskäyrä.....	32
Kuva 4.4: Johdinten asettelua hahmottava kuva. Todellisessa käämissä johdinkerroksia on 26 ja kierroksia keskimäärin 28. Keskellä kulkeva katkoviiva kuvaa solenoidikäämin pituusakselia.....	36
Kuva 4.5: Laskettu quenchin aikainen virran käyrämuoto vaimenemisajoilla 3,36 s käämille 1, 3,47 s käämille 2 ja 3,97 s käämille 3 johdintyyppille.....	42
Kuva 4.6: Hot spot- lämpötilan 200 K saavuttamiseen kuluva aika eri johdintyypeillä.....	45
Kuva 4.7: Laskennallisesti määritetyn hot spot- lämpötilan 88,7 K saavuttamiseen kuluva aika eri johdintyypeillä.....	45
Kuva 4.8: Hot spot- lämpötilan 90,1 K saavuttamiseen kuluva aika eri käyttövirroilla ja johdintyypeillä.....	46
Kuva 4.9: MIIT mallin antama lämpötilan 87,3 K saavuttamiseen kuluva aika eri johdintyypeillä.....	47
Kuva 5.1: Valokuva käämin 1 valmistuksen puolivälistä. Edellisen johdinkerroksen päälle ei ole lisätty vielä epoksikerrosta.....	48
Kuva 5.2: Valokuva käämin 3 valmistuksen lopusta. Uloimmankin johdinkerroksen päälle lisättiin kerros epoksia.....	49
Kuva 5.3: Koejärjestelyissä käytettyjen mittaustantureiden sijainteja havainnollistava kuva.....	50
Kuva 5.4: Käämin poikkileikkaus viimeistelyssä lisätyn epoksikerroksen havainnollistamiseksi. Musta alue kuvaa lisättyä epoksia ja pystysuora katkoviiva solenoidin pituusakselia.....	51
Kuva 5.5: Valokuva valmiista käämistä 3, johon on kiinnitetty mittaustanturit, lisätty kerros epoksia ja joka on kiinnitetty kryostaattiin.....	51
Kuva 5.6: Luvata Oy:n toimittamien short sample- mittaustulosten mukaiset kriittisten virtojen arvot magneettivuon tiheyden funktiona.....	53
Kuva 5.7: Koejärjestelyssä käytetty kytkentä.....	55
Kuva 6.1: Eri virtasuhteille määritetyt MQE- arvot.....	57
Kuva 6.2: Saavutettujen kriittisten virtojen arvot eri ramp- nopeuksilla.....	59
Kuva 6.3: Virran vaimenemisen käyrämuodot quenchin alkuhetken virran ollessa suunnilleen yhtä suuri. Heater- pulssi syötetään ajan hetkellä 0, jolloin katkaisija aukeaa virran jyrkän askeleen kohdalla.....	61
Kuva 6.4: Virran vaimenemiseen kuluvat ajat katkaisijan aukeamishetkestä eri virtasuhteiden arvoilla.....	62
Kuva 6.5: Virran keskimääräinen vaimenemisnopeus virtasuhteiden funktiona.....	62
Kuva 6.6: Käämien suurimmat mitatut quenchin aikaiset napajännitteet.....	64
Kuva 6.7: Käämin 1 quenchien aikaiset Cernox- antureiden ja termoparien näyttämät lämpötilat.....	65
Kuva 6.8: Käämin 2 quenchin aikaiset lämpötilat eri vakioenergioilla.....	65

Kuva 6.9: Käämin 3 lämpötila-anturien lukemat quenchin aikana tietyillä käämien energioiden arvoilla.....	66
Kuva 6.10: Quenchin jälkeinen lämpötilan aleneminen noin lämpötilasta 22 K takasin nesteheliumin lämpötilaan.	68
Kuva 6.11: Lämpötilamittausten perusteella määritetyt normaalialueen etenemisnopeudet käämin säteen suunnassa.....	69
Kuva 6.12: Käämin akselin suuntaiset normaalialueen etenemisnopeudet.....	70
Kuva 6.13: Johtimen suuntainen normaalialueen etenemisnopeus.	70
Kuva 6.14: Käämin 3 säteen suuntainen normaalialueen etenemisnopeus jännite- ja lämpötilamittausten perusteella määritettynä.....	71

LYHENTEET JA MERKINNÄT

BSCCO	Kuparioksideihin pohjautuva HTS-materiaalityyppi (Bismuth Strontium Calcium Copper Oxide)
CERN	Euroopan hiukkasfysiikan tutkimuskeskus (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)
HTS	Korkean lämpötilan suprajohde (High Temperature Superconductor)
LHC	Suuri hadronitörmäytin (Large Hadron Collider)
LTS	Matalan lämpötilan suprajohde (Low Temperature Superconductor)
MIIT	Quenchin mallintamiseen ja hot spot- lämpötilan määrittämiseen käytettävä malli (Mega I*I Time integral)
MPZ	Pienin quenchiin johtavan normaalialueen koko (Minimum Propagating Zone)
MQE	Pienin quenchiin johtava häiriöenergia (Minimum Quench Energy)
NZP	Quenchin aikainen normaalialueen eteneminen (Normal Zone Propagation)
RRR	Materiaalin korkean ja matalan lämpötilan resistiivisyyden suhde, joka kuvaa sen puhtausastetta (Residual Resistivity Ratio)
WIC	Suprajohdintyyppi, jossa ydinlanka on sijoitettu metalliseen kanaavaan (Wire-In-Channel)
YBCO	Toisen sukupolven yttrium-pohjainen HTS-materiaali (Yttrium Barium Copper Oxide)
a	Solenoidimagneetin sisäsäde
A	Poikkipinta-ala
b	Solenoidimagneetin ulkosäde
B	Magneettivuon tiheys
B ₀	Magneettivuon tiheys solenoidimagneetin akselilla
B _w	Magneettivuon tiheys solenoidimagneetin sisäpinnalla
B _c	Kriittinen magneettivuon tiheys
C	Ominaislämpökapasiteetti tilavuusyksikköä kohti
E	Sähkökentän voimakkuus
E _c	Sähkökenttäkriteeri
F	Solenoidimagneetin muotokerroin
f _p	Jäähdytysaineen kanssa kontaktissa olevan johtimen osuus
g _d	Häiriöenergia
g _q	Konvektiivisesti siirtynyt lämpö
H	Magneettikentän voimakkuus
H _c	Kriittinen magneettikentän voimakkuus
I	Johtimen virta
I _c	Suprajohtimen kriittinen virta
J	Virrantiheys
J _c	Suprajohteen kriittinen virrantiheys
k	Lämmönjohtavuus
l	Solenoidimagneetin korkeuden puolikas
l _{tot}	Käämin johtimen kokonaispituus
L	Induktanssi
L ₀	Lorenzin luku

n	Materiaalikohtainen suprajohteen resistiivisen transition jyrkkyyttä kuvaava termi
N_{tot}	Käämin johdinkierrosten kokonaislukumäärä
P_D	Johtimen ympärysmitta
Q	Lämpömäärä
R_{mx}	MPZ:n puoliakselin x suuntainen säde
R_Q	Quenchin aikainen normaalialueen resistanssi
t	Aika
T	Lämpötila
T_c	Kriittinen lämpötila
T_{cs}	Virran jakautumislämpötila
T_m	Hot spot- lämpötila
U	Suprajohtimen termisiä ja sähköisiä ominaisuuksia kuvaava suo- jausfunktio
v_x	Normaalialueen akselin x suuntainen etenemisnopeus
V	Jännite
V_{cs}	Magneetin virtalähteen jännite
V_{max}	Quenchin aikainen maksimijännite
V_{MPZ}	MPZ:n tilavuus
V_Q	Quenchin normaalialueen yli oleva jännite
α	Normaalialueen johtimeen nähden kohtisuoran ja pituussuuntaisen etenemisnopeuden suhde
α	Solenoidikäämin ulko- ja sisäsäteen suhde
β	Solenoidikäämin korkeuden puolikkaan ja sisäsäteen suhde
δ	Solenoidikäämin sisäpinnan ja keskiakselin magneettivuontiheyksi- en suhde
Γ	Johtimen MIIT arvo
λ	Komposiittijohtimessa materiaalin poikkipinta-alan osuutta kuvaa- va kerroin
μ	Permeabiliteetti
μ_0	Tyhjiön permeabiliteetti
ρ	Sähköinen resistiivisyys
Φ	Magneettivuo

1. JOHDANTO

Suprajohtavuusilmiön löytyminen vuonna 1911 avasi uusia ovia sähkötekniikan alalla. Hollantilainen fyysikko Heike Kamerlingh Onnes havaitsi ilmiön ensimmäisenä elohopeassa hänen mitatessa metallien resistiivisyyttä matalissa lämpötiloissa. Puhtaiden suprajohtavien alkuaineiden ominaisuudet kuitenkin tekivät niistä sopimattomia käytännön sovelluksiin. Ominaisuuksiltaan parempien suprajohtomateriaalien alalla läpimurto tapahtui 60-luvun alussa, jolloin kehitettiin ensimmäinen magneettiteknologiassa käytettävä matalan lämpötilan suprajohte, niobitina. Vuonna 1986 löydettiin ensimmäinen korkean lämpötilan suprajohte, mikä edelleen laajensi suprajohtavuuden käyttömahdollisuuksia.

Suprajohtavassa tilassa materiaalin sähköinen resistiivisyys häviää, minkä vuoksi johtimissa voidaan siirtää suuria virrantiheyksiä. Tämän vuoksi yksi tärkeä suprajohteiden käyttökohde on voimakkaat sähkömagneetit, joita puolestaan voidaan käyttää esimerkiksi lääketieteessä magneettikuvauksiin tai fysiikan alalla hiukkaskiihdyttimissä. Voimakkaaseen sähkömagneettiin varastoitunut energia voi olla vaaraksi magneetille, mikäli suprajohtava tila menetetään, eikä siihen ole varauduttu. Siksi turvallisuus ja magneetin suojaus ovat olennainen osa suprajohtomagneetin suunnittelua.

Tämän työn tarkoitus on tarkastella suprajohtomagneettia palautumattoman suprajohtavuuden menettämisen, quenchin, aikana. Magneetit valmistetaan Luvata Oy:n patentoimasta suprajohtintyyppistä, jossa suprajohtava ydinlanka sijaitsee avoimessa kuparisessa kanavassa. Tarkastelulla pyritään selvittämään kyseisen johdintyyppin ominaisuuksia sekä arvioimaan sen soveltuvuutta kryojäähdyttimillä toteutettuihin sovelluksiin. Quench- tapahtuman syntyä ja etenemistä pyritään ennustamaan ja mallintamaan suprajohtomateriaalin ominaisuuksien sekä magneetin rakenteen perusteella. Mallia sovelletaan käytännön magneeteilla tehtyihin mittauksiin, joista pyritään käänteisesti määrittämään magneetin valmistuksessa käytetyn suprajohtimen ominaisuuksia. Lopuksi tuloksia verrataan yleisemmin käytössä olevien suprajohtinten vastaaviin ominaisuuksiin.

2. SUPRAJOHTAVAN TILAN LUONNE

Suprajohtavuus perustuu kvanttimekaaniseen ilmiöön, jossa suprajohteen elektronit ryhmittyvät niin kutsutuiksi Cooperin pareiksi, joiden muodostumiseen liittyy materiaali-kohtainen sidosenergia. Mikäli elektronien energia on Cooperin parien sidosenergiaa suurempi, pareja ei muodostu ja suprajohtava tila ei ole mahdollinen. Elektronien energiaan vaikuttavista suureista seuraa suprajohteen kolme kriittistä suureta: kriittinen lämpötila T_c , kriittinen virrantiheys J_c ja kriittinen magneettivuon tiheys B_c . [1, s. 1.]

Suprajohtavuuteen liittyy kaksi merkittävää ilmiötä: suprajohteen resistanssin häviäminen ja ulkoisen magneettikentän hylkiminen materiaalin sisällä, eli niin sanottu Meissner-ilmiö [1, s. 2]. Käytännön suprajohteissa kumpikaan näistä ilmiöistä ei kuitenkaan ole täydellinen, mikä voi johtaa lämmön syntyyn johteen sisällä. Lämpötilan paikallinen nousu voi saada aikaan ketjureaktion, missä koko johdin ja siten esimerkiksi siitä käämitty magneetti siirtyy resistiiviseen tilaan. Tämä ilmiö tunnetaan nimellä quench ja sen voi aiheuttaa lukuisat eri tapahtumat, esimerkiksi muuttuva ulkoinen magneettikenttä tai johteen eristeen murtuminen käämityksen sisällä. Suprajohteen kykyä sietää erinäisiä käyttötilanteita ja häiriöitä ilman että ne johtavat quenchiin, kutsutaan stabiilisuudeksi. [2.]

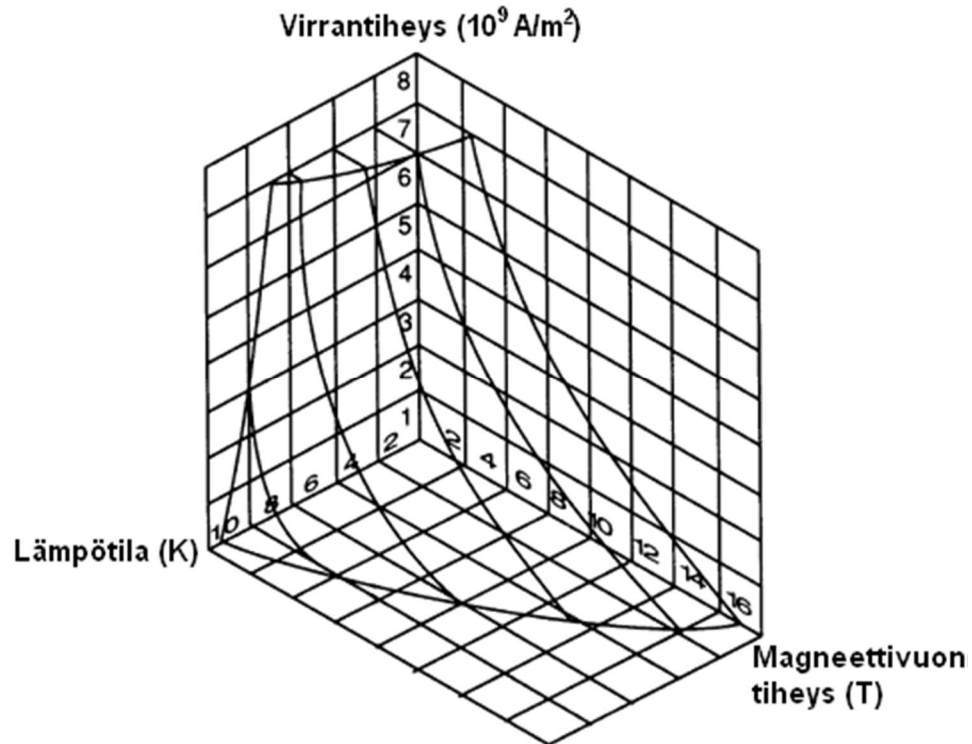
2.1 Suprajohteen kriittiset suureet ja luokittelu

Materiaalin lämpötila vaikuttaa elektronien liike-energiaan. Tämän vuoksi suprajohtemateriaalille on olemassa kriittinen lämpötila T_c , jonka yläpuolella elektronien energia on Cooperin parien sidosenergiaa suurempi. Matalan lämpötilan suprajohteilla (Low Temperature Superconductor, LTS) kriittinen lämpötila on 10 K:n suuruusluokkaa ja korkean lämpötilan suprajohteilla (High Temperature Superconductor, HTS) se voi olla 100 K:n tasolla. [1, s.1.] Alhaisten lämpötilojen vuoksi kaikki suprajohtesovellukset vaativat matalaa lämpötilaa ylläpitävän kryostaatin.

Elektronien liike-energia kasvaa myös suprajohtemateriaalin läpi ajetun virrantiheyden J ansiosta. Ulkoisen magneettikentän H yrittäessä tunkeutua suprajohtavan aineen sisään sen pintaan indusoituu suojavirtoja joiden synnyttämä magneettikenttä on ulkoisen kentän suuruinen, mutta vastakkaisuuntainen. Molemmissa tapauksissa suprajohteessa kulkeva sähkövirta kasvattaa elektronien liike-energiaa, minkä ansiosta suprajohtemateriaaleille on olemassa kriittinen virrantiheys J_c ja kriittinen magneettikentän voimakkuus H_c . [1, s. 1 – 2.] Yleisesti puhutaan kriittisestä magneettivuon tiheydestä B_c , sillä magneettikentän voimakkuuden ja magneettivuon tiheyden välillä on aineen permeabiliteetista μ riippuva yhteys:

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (2.1)$$

Yhden kriittisen suureen elektroneille antama energia pienentää muista lähteistä saatavaa sallittua energiamäärää, jos suprajohtava tila halutaan säilyttää. Kukaan kriittisistä suureista siis riippuu kahdesta muusta kriittisestä suureesta. Tämän johdosta suprajohtamateriaalille voidaan esittää $(\mathbf{J}, \mathbf{B}, T)$ -koordinaatistossa kriittinen pinta, jonka alapuolella materiaali on suprajohtavassa ja yläpuolella resistiivisessä tilassa. Kuvassa 2.1 on esitetty kriittinen pinta eräälle suprajohteelle.



Kuva 2.1: Erään kaupallisen niobititaani-suprajohteen kriittinen pinta. [2, s. 2]

Suprajohteet voidaan luokitella I- ja II-tyyppin suprajohteisiin. Ensimmäiset löydetyt puhtaasta metallista koostuvat suprajohteet kuuluivat I-tyyppin suprajohteisiin. Niille on ominaista täydellinen Meissner-ilmiö alikriittisillä magneettivuon tiheyksillä. Kriittisen magneettivuon tiheyden ylittyessä koko suprajohtava kappale siirtyy normaalitilaan. I-tyyppin suprajohteiden kriittinen magneettivuon tiheys on suurimmillaankin 0,1 T:n koluokkaa, mikä on liian pieni käytännön magneettisovelluksiin. [3, s. 5.]

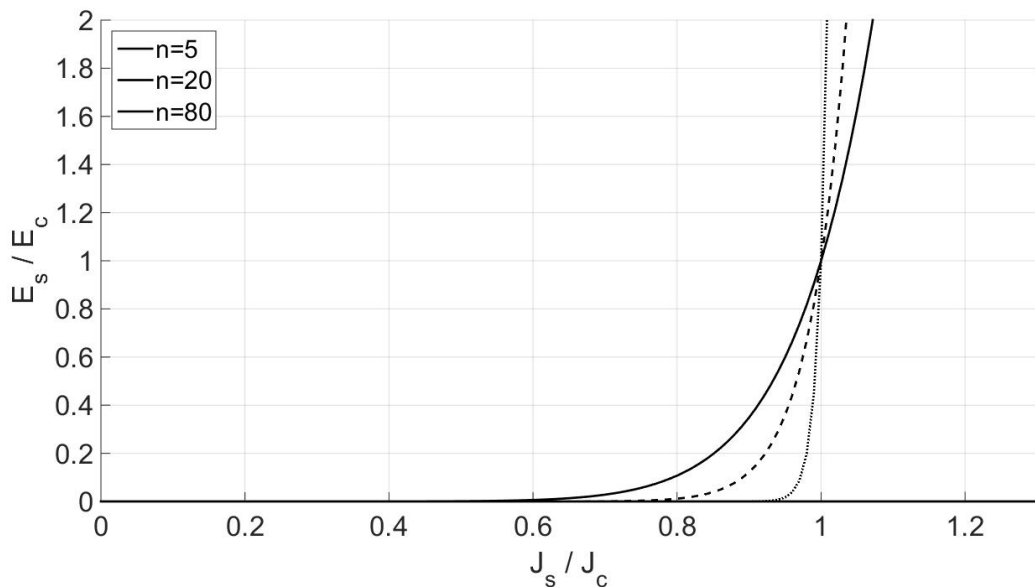
Magneettisovelluksissa käytettävät materiaalit ovat II-tyyppin suprajohteita. Niissä Meissner-ilmiö on täydellinen ainoastaan heikoissa magneettikentissä. Ulkoisen magneettikentän voimakkuuden kasvaessa II-tyyppin suprajohte siirtyy sekutilaan, jossa magneettivuo pääsee tunkeutumaan sen sisään normaalitilaan siirtyneitä niin kutsuttuja vuoputkia pitkin. Alinta magneettikentän voimakkuutta, jolla vuoputkia alkaa muodostua, merkitään termillä H_{c1} . Ulkoisen magneettikentän voimakkuuden kasvaessa vuoputkien määrä lisääntyy, kunnes ylemmällä kriittisellä magneettikentän arvolla H_{c2} koko

kappale on normaalitilassa. LTS-materiaaleille H_{c2} :n arvo on kokoluokkaa 10 - 20 T ja HTS-materiaaleilla on arvioitu päästävän jopa yli 100 T:n arvoihin. [3, s. 5 – 8.]

Koska II-tyypin suprajohteilla ei ole selvää rajaa suprajohtavan ja resistiivisen tilan välillä, sen määrittämiseen käytetään niin sanottua sähkökenttäkriteeriä. Suprajohteeseen tunkeutuvien vuoputkien ansiosta siinä voi esiintyä resistanssia alikriittisilläkin virroilla, mikä puolestaan saa aikaan sähkökentän johteen sisälle. Johteessa kulkevan virrantiheyden J_s ja siinä esiintyvän sähkökentän E_s välille on kokeellisesti määritetty yhteys:

$$E_s = E_c \left(\frac{J_s}{J_c} \right)^n \quad (2.2)$$

E_c on kriittinen sähkökenttä, jonka arvoksi määritellään tyypillisesti 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ HTS-materiaaleille ja 0,1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ LTS-materiaaleille. Kaavassa 2.2 esiintyvä termi n on materiaalikohtainen transition jyrkkyyttä kuvaava muuttuja. Kuvassa 2.2 on havainnollistettu n -arvon vaikutusta sähkökentän muodostumiseen.



Kuva 2.2: Suhteellisen sähkökentän suuruus suhteellisen virrantiheyden funktiona n -arvoilla 5, 20 ja 80.

Pienen n -arvon omaavilla materiaaleilla johteen sisällä esiintyy sähkökenttä, ja siten resistiivisiä häviöitä jo huomattavasti kriittisen virran alapuolella. HTS-materiaaleille on ominaista verrattaen pienet n -arvot välillä $\sim 10 - 20$. Suuren n -arvon materiaaleilla häviöitä alkaa esiintyä vasta kriittisen virran lähistöllä. LTS-materiaaleilla puolestaan on tyypillisesti suuri n -arvo, kokoluokkaa 30 – 80. [3, s. 370.]

2.2 Komposiittijohtimen rakenne

Suprajohdemateriaalien normaalitilan ominaisuudet estävät johtimen valmistamisen puhtaasta suprajohteesta. Normaalitilassa suprajohteen resistanssi on suuri ja lämmön-

johtavuus pieni, minkä vuoksi pienelläkin vapautuneella häiriöenergian määrällä voisi olla merkittäviä seurauksia. Käytännön suprajohtimet valmistetaan komposiittijohtimiksi, joissa ainoastaan osa johtimen poikkipinta-alasta on suprajohdetta. Muita komposiittijohtimen osia ovat matriisimetalli, sähköeriste sekä joidenkin johdinmateriaalien yhteydessä vaadittu kemiallisia reaktioita tai metallien diffuusiota estävä suojakerros. [3, s. 359 – 360.] Rakenteeltaan monimutkaisemmat suprajohdekaapelit voivat sisältää ylimääräistä mekaanista tukea antavia rakenteita sekä esimerkiksi virtauskanavia johtimen sisällä kulkevalle jäähdytysaineelle. [3, s. 379 – 380.] Kuvassa 2.3 on esitetty erään pyöreän komposiittijohtimen poikkileikkaus. Suprajohtimet voidaan valmistaa myös poikkileikkaukseltaan suorakaiteen muotoisiksi.



Kuva 2.3: Luvata Oy:n valmistaman 54-säikeisen suprajohtimen poikkileikkaus. Tummat alueet ovat suprajohdetta, jota ympäröi kuparinen matriisimetalli. [4]

Komposiittijohtimissa suprajohde on rakenteeltaan tyypillisesti matriisimetalliin upotettuina säikeinä. Yksinkertaisimmillaan suprajohdin voisi olla yksittäinen matriisimetallin ympäröimä suprajohdelanka, mutta käytännössä suprajohteen osuus jaetaan aina useaan pienempään filamenttiin, mikä tuo etuja sekä stabiilisuuden näkökulmasta vähentämällä vuonohyppyjen todennäköisyyttä että pienentämällä johtimen vaihtovirtahäviöitä [2, s. 77, 197].

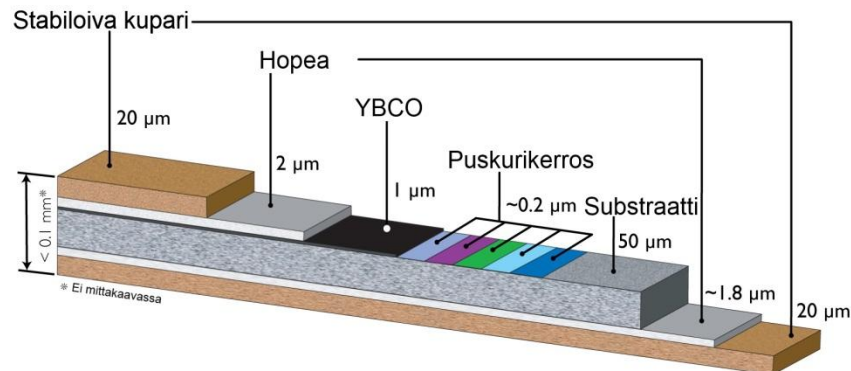
2.2.1 Kaupalliset suprajohteet

Vain muutaman suprajohdinmateriaalin kehitys on saavuttanut kaupallisen tason. Suprajohteella tulee olla hyvät tekniset ominaisuudet ja lisäksi sen täytyy olla taloudellisesti kilpailukykyinen. Korkeat valmistus- ja materiaalikustannukset voivat nostaa suprajohdesovelluksen kustannukset liian suuriksi käytännön sovellusten kannalta. Lisäksi joissain tapauksissa suprajohteen tulee olla kilpailukykyinen konventionaalisilla johtimilla toteutettuihin ratkaisuihin verrattuna.

Matalan lämpötilan suprajohteet ovat pidemmälle kehitettyjä ja käyttöön on vakiintunut kaksi suprajohdetyyppiä: niobititaani (NbTi) ja niobitina (Nb₃Sn). Korkean lämpötilan suprajohteita on tutkittu lyhyemmän ajan, minkä vuoksi kehitys ei ole vielä matalan lämpötilan suprajohteiden tasolla. Tällä hetkellä markkinoilla olevia HTS-materiaaleja ovat kuparioksideihin pohjautuvat vismuttiyhdisteet Bi-2212 (Bi₂Sr₂CaCu₂O₈) ja Bi-

2223 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$), magnesiumdiboridi (MgB_2) sekä ohutkalvotekniikalla valmistettu YBCO-johdin ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$). [3, 9]

YBCO-johdinta lukuun ottamatta johtimet valmistetaan vetämällä poikkileikkaukseltaan joko pyöreiksi tai suorakaiteen muotoisiksi siten, että suprajohde on matriisimetalliin upotettuina säikeinä. Näitä filamenttijohtimia kutsutaan ensimmäisen sukupolven suprajohtimiksi. Toisen sukupolven HTS-johtimet valmistetaan niin kutsutulla ohutkalvomenetelmällä, jolloin poikkileikkaukseltaan suorakulmainen johdin koostuu tasoista kuvan 2.4 esittämällä tavalla.



Kuva 2.4: SuperPower Inc. yrityksen valmistaman YBCO-johtimen rakenne. Suprajohteen, stabiloivan kuparikerroksen ja suojaavan hopeakerrosten lisäksi johteessa on kasvualusta eli substraatti sekä puskurikerros. [11]

Myös toisen sukupolven suprajohtimet sisältävät stabilisoivaa materiaalia, esimerkiksi kuparia ja suojaava kerros hopeaa, mutta suprajohde ei ole matriisimetalliin upotettuina säikeinä yleisemmän ratkaisun tapaan. [9, s. 1640.] Ohuen suprajohdekerroksen kasvatamiseen kasvualustan eli substraatin päälle on olemassa eri menetelmiä. Kasvattamiseen ja valmiin johtimen ominaisuuksiin vaikuttaa myös substraatin päällä käytettävä suojaava ja muodostuvaa suprajohdekalvoa tasoittava puskurikerros. Puskurikerroksen materiaaleina käytetään erinäisiä oksidiyhdisteitä. [12.]

Niobititaani johdinten valmistus on pitkälle kehitetty ja optimoitu, minkä vuoksi siitä voidaan valmistaa helposti pitkiä johtopituuksia. Niillä voidaan saavuttaa noin 10 – 11 T:n kriittinen magneettivuon tiheys 4,2 K:n lämpötilassa [3, s. 8], minkä vuoksi niobititaania käytetään magneettikuvauslaitteissa sekä joissain hiukkaskiihdyttimissä. [9, s. 1643 – 1644.]

Suurempaan kriittiseen magneettivuon tiheyteen päästään niobitinajohtimilla. Niillä on saavutettu yli 24 T:n B_{c2} arvo 4,2 K:ssä virrantiheyden ollessa nollassa [3, s. 8]. Niobitinan valmistusta ja käyttöä hankaloittaa sen muuttuminen hauraaksi lämpökäsittelyn yhteydessä. Eri valmistusmenetelmillä haittoja voidaan lieventää ja niobitinaa voidaan käyttää erittäin voimakkaita magneettikenttiä vaativissa sovelluksissa, esimerkiksi fuusiovoiman yhteydessä plasman koossapitoon [9, s. 1645].

HTS-materiaaleilla korkeampi kriittinen lämpötila tekee jäähtymisestä helpommin toteutettavan. Kuparioksiidiin perustuvien BSCCO-2212 ja BSCCO-2223 kriittiset lämpötilat ovat 90 K ja 110 K. Tämän vuoksi niiden jäähtymiseen voidaan käyttää nesteheliumiin verrattuna erittäin paljon edullisempaa nestetyppeä. Niillä on arvioitu mahdollisesti saavutettavan jopa yli 100 T:n kriittisiä magneettivuon tiheyksiä. BSCCO-johdinten haittapuolina ovat hankala valmistusmenetelmä sekä hopean käyttö matriisimetallina. Suprajohteen kemialliset ominaisuudet estävät kuparin käytön matriisimetallina. [9, s. 1647 – 1648.]

Kaupallisista suprajohteista uusin on magnesiumdiboridi. Sen suprajohtavuus havaittiin vuonna 2001 kriittisen lämpötilan 40 K alapuolella [9, s. 1651]. Magnesiumdiboridin kiderakenteella on suuri merkitys sen kriittiseen magneettivuon tiheyteen, jonka suuruus riippuu merkittävästi siihen kohdistuvan magneettikentän suunnasta. Sen suuruuden on arvioitu vaihtelevan välillä 60 T johtimen suuntaisessa ja 35 T johdinta vastaan koh-tisuorassa magneettikentässä. [3, s. 8.] Hyvän kriittisen magneettivuon tiheyden lisäksi magnesiumdiboridin etuna ovat magnesiumin ja boorin alhaiset materiaalikustannukset [9, s. 1651].

YBCO-johdin on myös ominaisuuksiltaan lupaava. Sen kriittinen lämpötila on 93 K, mikä mahdollistaa sen jäähtymisen nestetypellä, ja sillä on arvioitu saavutettavan jopa noin 150 T kriittinen magneettivuon tiheys. [3, s. 8.] YBCO-johtimen valmistus poikkeaa ensimmäisen sukupolven johteista merkittävästi, mutta siitä huolimatta niillä on ennustettu saavutettavan kuparin kanssa taloudellisesti kilpailukykyisiä valmistuskustannuksia [9, s. 1649].

2.3 Suprajohteen häiriöt ja lämmön synty

Täysin ideaalisessa tilanteessa suprajohde kuljettaisi tasavirtaa häviöttömästi. Käytännössä lämpöä voi kuitenkin generoitua suprajohteessa esimerkiksi sähköisistä tai mekaanisista syistä.

Suprajohdesovellusta suunniteltaessa on huomioitava suprajohteessa syntyvä lämpö sekä tavallisissa käyttöolosuhteissa että häiriötilanteissa. Tavallisissa käyttöolosuhteissa syntyvä lämpö on helpommin ennustettavissa varsinkin jos suprajohtimen ominaisuudet tunnetaan hyvin. Häiriötilanteet puolestaan ovat vaikeammin ennustettavissa ja siksi suprajohdesovellusten häiriökestoisuus eli stabiilisuus on otettava huomioon osana suunnitteluprosessia. [2, s. 70.]

Suprajohteessa esiintyviä häiriöitä voidaan havainnollistaa niin kutsutun häiriöspektrin avulla. Siinä häiriöt jaotellaan ajallisesti transientteihin ja jatkuviin häiriöihin, sekä paikan suhteen paikallisiin ja hajautuneihin häiriöihin. Häiriöiden suuruutta kuvataan niiden yhteydessä vapautuneen ja lämmöksi muuttuneen energian määrällä. Häiriöiden yhteydessä käytettävät yksiköt voidaan täten esittää taulukon 2.1 tavalla. [2, s. 70.]

Taulukko 2.1: Suprajohteiden häiriöspektri. Taulukon arvot kuvaavat eri häiriötyyppien yhteydessä käytettäviä yksiköitä.

Aika	Paikka	
	Paikallinen	Hajautunut
Transientti	J	J/cm ³
Jatkuva	W	W/cm ³

Paikallisissa häiriöissä häiriöenergian katsotaan vapautuvan pistemäisessä tilavuudessa. Tällöin häiriön suuruuden mittayksikkönä käytetään transientin eli äkillisesti tapahtuvan häiriön yhteydessä jouleja ja jatkuvan häiriön yhteydessä watteja. Suurempaan tilavuuteen jakaantuneiden häiriöiden yhteydessä on mielekkäämpää puhua transienttien häiriöiden tapauksissa energiatiheyksistä ja jatkuvien häiriöiden yhteydessä tehosiheyksistä.

Suprajohteilla quenchiin johtavat häiriöenergiat ja -energiatiheydet ovat tyypillisesti erittäin pieniä varsinkin käämityksissä, jotka ovat jäähdytysaineen kanssa kontaktissa ainoastaan ulkopintansa kautta. Tällaisia magneetteja kutsutaan adiabaattisiksi, koska erityisesti transienttien häiriöiden tapauksissa käämin ja jäähdytysaineen välillä ei ehdi tapahtua merkittävää lämmön siirtymistä. Tämän vuoksi on tärkeää tuntea mahdolliset häiriötekijät, jotta niihin voidaan varautua ja magneetin toiminnasta saadaan stabiilia ja turvallista.

2.3.1 Jatkuvat häiriöt

Jatkuva paikallinen häiriö voi olla esimerkiksi suprajohtimien resistiivisessä liitoksessa syntyvä lämpö. Liitoksia voidaan tarvita esimerkiksi erityyppisten johdinten välille, mikäli magneetin eri osat halutaan toimivan eri virrantiheyksillä. Myös yksinkertaisesti johtimien valmistuksen asettamat rajoitukset yksittäisen johtimen maksimipituudelle voivat vaatia useamman johtimen liittämisen toisiinsa. Hyvin suunnitteleamalla liitosten aiheuttama lämpötilan nousu voidaan kuitenkin saada käytännön kannalta merkityksettömälle tasolle, esimerkiksi 10^{-3} K:n kokoluokkaan. [2, s. 314 – 315.]

Jatkuvia hajautuneita häiriöitä ovat vaihtovirtasovelluksissa muuttuvan magneettikentän aiheuttamat häviöt. Muuttuva virta ja magneettikenttä kohdistavat Lorentz-voiman II-tyyppin suprajohteissa esiintyviin vuoputkiin. Tämä saa aikaan vuoputkien liikettä, mikä puolestaan synnyttää resistiivisiä häviöitä magneettivuon tiheyden muuttuessa suprajohteessa. [3, s. 6.] Vuoputkien liikkeen vaikutusta kriittiseen virrantiheyteen voidaan lieventää lisäämällä suprajohteeseen epäpuhtauksia sen valmistusvaiheessa. Näitä normaalitilaisia epäpuhtauksia kutsutaan *pinning-keskuksiksi* ja niiden tarkoitus on tarjota vuoputkille pienemmän energian vaativa normaalitilainen reitti suprajohteen läpi. Tällöin *pinning-keskuksen* vuoputkeen kohdistama *pinning-voima* vastustaa vuoputkea liikuttavaa Lorentz-voimaa. [2, s. 284; 3, s. 9.] Kriittisen virrantiheyden arvolla Lorentz- ja

pinning- voimat ovat yhtä suuret. Virrantiheyden ylittäessä kriittisen arvon *pinning-voima* ei ole enää riittävä pitämään vuoputkia paikoillaan, jolloin niiden vapaan liikkeen aiheuttama lämpö saa aikaan suprajohtavan tilan menettämisen. [2, s. 284.]

Muuttuva magneettikenttä myös synnyttää pyörrevirtoja komposiittijohtimen matriisimetallissa, jotka puolestaan aiheuttavat resistiivisiä häviöitä.

Lisäksi Meissner- ilmiön aikaansaavat suojavirrat aiheuttavat hystereesihäviöitä muuttuvassa magneettikentässä. Suprajohdesäikeiden pinnalle muodostuu suojavirta, jonka aiheuttama magneettikenttä on ulkoisen kentän suuruinen, mutta vastakkaisuuntainen. Suojavirta kasvaa, kunnes se saavuttaa kriittisen virran arvon tai ulkoisen kentän tunkeutuminen suprajohteen sisään pysähtyy. Muuttuva magneettikenttä suprajohdesäikeen pinnalla saa aikaan sähkökentän, jossa kulkeva virta aiheuttaa häviöitä. Ulkoisen magneettikentän laskiessa nolnaan suojavirrat jäävät kiertämään säikeiden pinnassa vastuksettomassa tilassa. Ulkoisen kentän vaihtaessa suuntaansa suojavirtojen on vaimettava ja myös vaihdettava suuntaansa, jolloin magneettikenttä johtimen sisällä muuttuu jälleen ja aiheuttaa häviöitä. [2, s. 159 – 170.]

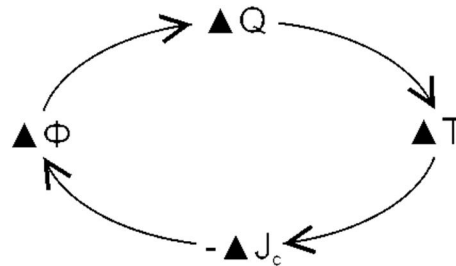
Vaihtovirtasovelluksissa voi esiintyä myös komposiittijohtimen säikeiden kytkeytymistä. Idealisessa tapauksessa magneettikentän aiheuttamat suojavirtasilmukat kulkisivat ainoastaan suprajohdesäikeitä pitkin. Suojavirrat voivat muodostaa matriisimetallin läpi kulkevan virtasilmukan, jos muuttuvan magneettikentän aiheuttama jännite suprajohdesäikeessä on suurempi kuin matriisimetallin yli muodostuva jännitehäviö. Tällöin säikeiden suojavirtojen meno- ja paluuvirrat kulkevat eri säikeitä pitkin. [2, s. 136.] Tätä ilmiötä kutsutaan säikeiden kytkeytymiseksi. Huonoimmassa mahdollisessa tapauksessa kaikki johtimen säikeet ovat kytkeytyneet, jolloin se käyttäytyy yksifilamenttisen johtimen tapaan. [2, s. 139.]

Ulkoisen magneettikentän aiheuttamaa kytkeytymistä voidaan estää kiertämällä suprajohtinta oman pituusakselinsa ympäri, jolloin johtimen kokeman magneettikentän suunta muuttuu puolen kierroksen välein. Johtimessa kulkevan virran aiheuttamaan omakenttään kierteistämällä ei ole vaikutusta. [2, s. 136 – 138.] Kytkeytymistä voidaan vastustaa myös vaikuttamalla matriisimetallin resistiivisyyteen seostamalla siihen heikommin sähköä johtavia metalleja.

Jatkuvia hajautuneita häiriöitä ovat myös sekatiilaan siirtyneen suprajohtimen resistiiviset häviöt. Niitä voi esiintyä, jos johdinta käytetään esimerkiksi lähellä sen kriittisiä arvoja, varsinkin jos suprajohdemateriaalilla on pieni n -arvo. Tämän vuoksi kyseisiä häviöitä ei käytännössä esiinny LTS-materiaalien yhteydessä.

2.3.2 Transientit häiriöt

Transientit häiriöt ovat suunnittelun kannalta hankalampia, sillä niiden ennustaminen voi olla vaikeaa ja toistuminen näennäisesti satunnaista. Niin kutsuttu vuonhyppy kuuluu hajautuneisiin transientteihin häiriöihin. Vuonhyppyn lähtökohtana on sama periaate kuin vaihtovirtahäviöitä aiheuttavassa magneettikentän tunkeutumisessa suprajohteen sisään. Vuonhyppyn tapauksessa on kuitenkin kyse itseään ruokkivasta ketjureaktiosta, joka ei vaadi muuttuvaa magneettikenttää. Ketjureaktion periaatetta on havainnollistettu kuvassa 2.5.



Kuva 2.5: Vuonhyppyyn johtavan ketjureaktion kaaviokuva. [2, s. 133.]

Suprajohteen lämpötilan T muuttuessa mistä tahansa syystä myös sen kriittinen virrantiheys muuttuu. Lämpötilan kasvaessa kriittinen virrantiheys pienenee, minkä ansiosta magneettikenttää vastustavat suojavirrat vaimenevat. Tällöin magneettivuo Φ pääsee tunkeutumaan yhä syvemmälle suprajohteen sisään, jolloin magneettivuon muutos saa aikaan lisää häviöitä Q , jotka puolestaan nostavat lämpötilaa. Tätä tapahtumaa kutsutaan vuonhyppyksi ja se voi johtaa quenchiin. Vuonhyppy voidaan estää valmistamalla suprajohtimien ohuista säikeistä, ja sen aiheuttamilta quencheilta osataan nykyään välttää tehokkaasti. [2, s. 130 – 133.] Mikäli johtimessa tapahtuu säikeiden kytkeytymistä, säierakenteesta saadut edut vuonhyppyn estämiseen voidaan menettää [2, s. 137 – 139].

Paikalliset transientit häviöt ovat tyypillisesti luonteeltaan mekaanisia. Ne voivat johtua magneetin käämityksessä käytettävän johtimen liikahtamisesta tai johtimen eristeen tai käämin kyllästeen murtumisesta. Erityisen alttiita näiden häiriöiden aiheuttamille quencheille ovat sellaiset LTS-magneetit, jotka ovat vuorovaikutuksessa jäähdytysaineen kanssa ainoastaan ulkopintansa kautta. Näitä magneetteja kutsutaan adiabaattisiksi ja niitä ovat esimerkiksi nesteheliumkylpyyn upotetut magneetit, joissa ei ole jäähdytysaineelle sisäisiä virtauskanavia. [3, s. 410 – 411.]

Voimakkaassa magneettikentässä virtaa kuljettaviin johtimiin kohdistuu suuri Lorentzvoima. Tämä voima voi saada aikaan johtimen liikettä myös hyvin valmistetuissa käämeissä. Johtimen liikkeen seurauksena osa liike-energiasta muuttuu lämmöksi kitkan vaikutuksesta ja jopa noin $10 \mu\text{m}$:n liikahtus voi olla riittävä saamaan aikaan quenchin [3, s. 411]. Johtimien liikettä voidaan pyrkiä estämään kyllästäväällä käämi esimerkiksi epoksilla. Kyllästeen käyttämisellä on toisaalta myös haittapuoli. Matalissa LTS-magneettien käyttölämpötiloissa kylläste muuttuu tyypillisesti kovaksi, mutta samalla

myös hauraaksi. Suurien Lorentz-voimien ansiosta kylläste voi murtua, mikä generoi lämpöä ja voi saada aikaan quenchin. [2, s. 64.]

2.4 ”Degradation”- ja *training*- ilmiöt

Suprajohtimen suorituskykyä arvioidaan usein niin kutsuttujen *short sample*- arvojen perusteella. Ne ovat johtimelle lyhyestä koepalasta määritetyt kriittisten suureiden arvot ja niitä voidaan pitää johtimen suorituskyvyn ylärajana. *Short sample*- mittauksilla määritetään usein kriittisen virrantiheyden arvo eri ulkoisen magneettikentän arvoissa. LTS-materiaalien yhteydessä mittaukset suoritetaan tyypillisesti heliumin kiehumislämpötilassa eli 4,2 K:ssä. [2, s. 233.]

Suprajohdemagneetti voi kokea quenchin jo merkittävästi johtimen *short sample*-arvojen mukaisen kriittisen virran alapuolella. Tätä ilmiötä kutsutaan käämin heikentymiseksi (*coil degradation*). Heikentymistä voivat aiheuttaa edellä käsitellyt paikalliset ja hajautetut häiriöt, jolloin käämissä generoituva lämpö laskee kriittisen virran arvoa. Jatkuvien häiriöiden vaikutus voidaan ottaa helpommin huomioon niiden säännöllisyyden ja toistuvuuden ansiosta, jolloin hankalampia heikentymisen lähteitä ovat transientit häiriöt. [2, s. 70.]

Heikentymisen vaikutuksesta käämin huonontunut suorituskyky voi parantua toistuvien quenchien myötä, jolloin sillä päästään lähemmäksi johtimen *short sample*- arvoja. Tätä ilmiötä kutsutaan nimellä *training* ja se voidaan selittää ainakin osittain kääminnäissä syntyneiden jännitystilojen vapautumisella. Magneetin virtaa kasvatettaessa käämin johtimeen kohdistuva voima kasvaa, jolloin esimerkiksi impregnointiin käytetty epoksi murtuu tai johdin liikahtaa jännitystilaa vapautuessa, mikä johtaa quenchiin. Kun virtaa kasvatetaan uudestaan quenchin jälkeen, edellisen quenchin aiheuttaneen häiriön energia on jo vapautunut, ja virtaa voidaan mahdollisesti kasvattaa edellistä toistoa korkeammalle. Käytännön kannalta on kuitenkin suotavaa, että *training*- ilmiön edut saavutetaan mahdollisimman vähillä toistoilla erityisesti LTS-käämien tapauksessa, sillä toistuvien quenchien aiheuttama nesteheliumin kiehumaa voi olla taloudellisesti merkittävä tekijä. [2, s. 68 – 70, 87.]

2.5 Suprajohteen stabiilisuus

Stabiilisuudella tarkoitetaan suprajohteen kykyä sietää käytölle ominaisia häiriöitä ilman suprajohtavan tilan menettämistä. Käytölle ominaisilla häiriöillä voidaan tarkoittaa suprajohteessa Lorentz-voiman ansiosta tapahtuvaa mekaanista liikettä ja muuttuvan magneettikentän aiheuttamia häiriöitä, joiden suuruutta voidaan arvioida sen käyttöolosuhteiden perusteella. Stabiilin suprajohteen on siis kyettävä säilyttämään suprajohtava tila odotettavissa olevien häiriöiden tilanteessakin. Stabiilisuuden rajan ylittävästä häiriöstä seuraa suprajohteen siirtyminen normaalitilaan, jonka seurauksena magneettikent-

tään varastoitunut energia vapautuu pääasiassa lämmön muodossa ja virta vaimenee nolnaan normaalialueen resistanssin vuoksi.

Stabiilisuuden kriteerit perustuvat lämmönjohtumisen yleiseen osittaisdifferentiaaliyhtälöön. Yksinkertaistettuna suprajohde on stabiili, mikäli häiriöstä johteeseen syntyvää lämpöä poistuu siitä nopeammin kuin sitä generoituu. Matemaattisena kaavana se voidaan esittää kaavan 2.3 tapaan, missä C on lämpökapasiteetti, T on lämpötila, t on aika, k on lämmönjohtavuus, ρ on sähköinen resistiivisyys, g_d on muusta kuin Joule-häviöistä generoitunut lämpö, P_D on johtimen ympäröimä, f_p on jäähdytysaineen kanssa kontaktissa olevan johtimen osuus, A on johtimen poikkipinta-ala ja g_q on konvektiivisesti johtimesta poistuva lämpö. Alaindeksi cd viittaa komposiittijohtimeen ja alaindeksi op tarkoittaa käyttölämpötilaa. [3, s. 352.]

$$C_{cd}(T) \frac{\delta T}{\delta t} = \nabla \cdot [k_{cd}(T) \nabla T] + \rho_{cd}(T) J_{cdOP}^2(t) + g_d(t) - \left(\frac{f_p P_D}{A_{cd}}\right) g_q(t) \quad (2.3)$$

Kaavassa 2.3 esiintyvät termit on esitetty tilavuusyksikköä kohti. Vasemmanpuoleinen termi kuvaa lämpöenergian muutosta ajan suhteen, ja stabiilisuuden kannalta sen on pysyttävä nollassa. Yhtäsuuruusmerkin oikealla puolella ensimmäinen termi kuvaa lämmön johtumista komposiittijohdinta pitkin. Toinen termi kuvaa johtimessa syntyviä resistiivisiä häviöitä ja kolmas häiriöenergiaa. Viimeinen termi kuvaa johtimesta jäähdytysaineeseen konvektiivisesti siirtyvää lämpöä. [3, s. 352.] Adiabaattisessa tilanteessa jäähdytysaineen vaikutusta johtimeen ei huomioida, jolloin viimeinen termi merkitään nolllaksi.

2.6 Stabiilisuuskriteerit MPZ ja MQE

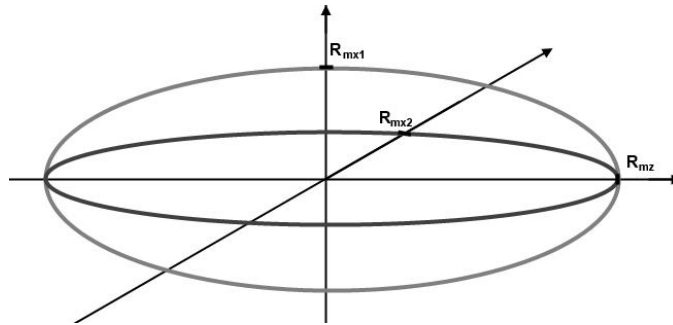
Suprajohteen stabiilisuutta voidaan kuvata kahden toisiinsa liittyvän kriteerin perusteella. Ensimmäinen kriteereistä on kooltaan pienin quenchin johtava normaalialue MPZ (*Minimum Propagating Zone*). Yksinkertaisimmillaan MPZ esitetään pallon muotoisena normaalialueena, jonka säde on R_{mz} ja jossa syntyvät häviöt kasvattavat normaalialuetta rajatta eli häiriöstä seuraa quench. Sitä pienemmät normaalialueet kutistuvat ja häviävät itsestään häiriöstä syntyneen lämmön tasaantuessa johtamalla johdinta pitkin. [3, s. 391.] Käämityksessä lämmönjohtavuus johtimen pituussuunnassa on merkittävästi suurempi kuin sitä vastaan kohtisuoraan, jolloin syntynyt normaalialue on muodoltaan kuvan 2.6 kaltainen ellipsoidi. [2, s. 80.]

Johtimen MPZ-sädettä R_{mz} voidaan approksimoida kaavan 2.4 avulla, missä k_z on johtimen pituussuuntainen lämmönjohtavuus ja alaindeksi m viittaa suprajohdinten matriisimetallin arvoihin.

$$R_{mz} = \sqrt{\frac{3k_z(T_c - T_0)}{J_m^2 \rho_m}} \quad (2.4)$$

Jos MPZ mallinnetaan ellipsoidin muotoiseksi, muiden puoliakseleiden suuntaiset normaalialueen säteet R_{mxi} voidaan laskea sen suuntaisen lämmönjohtavuuden ja kaavasta 2.4 lasketun säteen avulla. Puoliakselin x_i suuntainen MPZ:n säde saadaan kaavan 2.5 mukaan, missä k_{xi} on kyseisen akselin suuntainen lämmönjohtavuus.

$$R_{mxi} = \sqrt{\frac{k_{xi}}{k_z}} R_{mz} \quad (2.5)$$



Kuva 2.6: MPZ ellipsoidia havainnollistava kuva.

Puhtaasta suprajohteesta valmistetulle niobititaani johtimelle MPZ-säde olisi alle mikrometrin luokkaa suprajohteen normaalitilan suuren resistiivisyyden ja pienen lämmönjohtavuuden vuoksi. Tämän vuoksi suprajohditet valmistetaan komposiittijohtimiksi, jotka sisältävät paremmin sähköä ja lämpöä johtavaa matriisimetallia. Esimerkiksi kuparia matriisimetallina käyttävässä niobititaani johtimessa MPZ-säde on kokoluokaltaan millimetrien tasolla. [3, s. 391.]

Toinen stabiilisuuksikriteeri on pienin quenchiin johtava häiriöenergian määrä MQE (*Minimum Quench Energy*). MQE vastaa energiamäärää, joka tarvitaan synnyttämään edellä määritetyn MPZ:n suuruinen normaalialue. Normaalialueen, jonka tilavuus on V_{MPZ} , lämpötilan nostamiseen käyttölämpötilasta T_{op} kriittiseen lämpötilaan T_c vaadittavaa energiaa voidaan approksimoida kaavalla 2.6. [3, s. 357 – 358.]

$$MQE = V_{MPZ} \int_{T_{op}}^{T_c} C(T) dT \quad (2.6)$$

Matalissa lämpötiloissa materiaalien ominaislämpökapasiteetit ovat hyvin pieniä, minkä vuoksi erityisesti LTS-sovelluksissa MQE saa pieniä arvoja. MQE:n suuruus riippuu käytetyistä materiaaleista ja käyttöolosuhteista, ja pienimmillään sen suuruutta voidaan mitata mikrojouleissa. [2, s. 84.]

3. QUENCH- TAPAHTUMA

Suprajohdemagneetin hyvällä suunnittelulla voidaan välttyä monilta potentiaalisilta ennenaikaisen quenchin aiheuttavilta tekijöiltä. Hajautettuihin ja jatkuviin häiriöihin voidaan useimmissa tapauksissa varautua tai niiltä voidaan välttyä suunnittelemalla ja mitoittamalla magneetti oikein. Paikalliset transientit häiriöt ovat ennalta arvaamattomia ja siksi suprajohdemagneetit on suunniteltava siten, että quenchnet tapahtuvat turvallisesti, eivätkä käämit vaurioidu tai aiheuta vaaratilanteita.

Mikäli paikallisen häiriön aiheuttamassa quenchissa normaali-alue ei leviä riittävän nopeasti, lähes kaikki magneettiin varastoitunut energia voi muuttua lämmöksi pienessä tilavuudessa, mikä voi nostaa paikallisen lämpötilan vaarallisen korkeaksi. Resisttiivisen normaali-alueen yli voi myös muodostua korkea jännite magneetin suuren virran kulkiessa sen läpi. Näiden ominaisuuksien vuoksi on siis tärkeää, että quenchin alettua magneetin virta vaimenee mahdollisimman nopeasti, ja että virran syöttö magneettiin katkaistaan nopeasti.

3.1 Suprajohtimen ominaisuudet ja quenchin synty

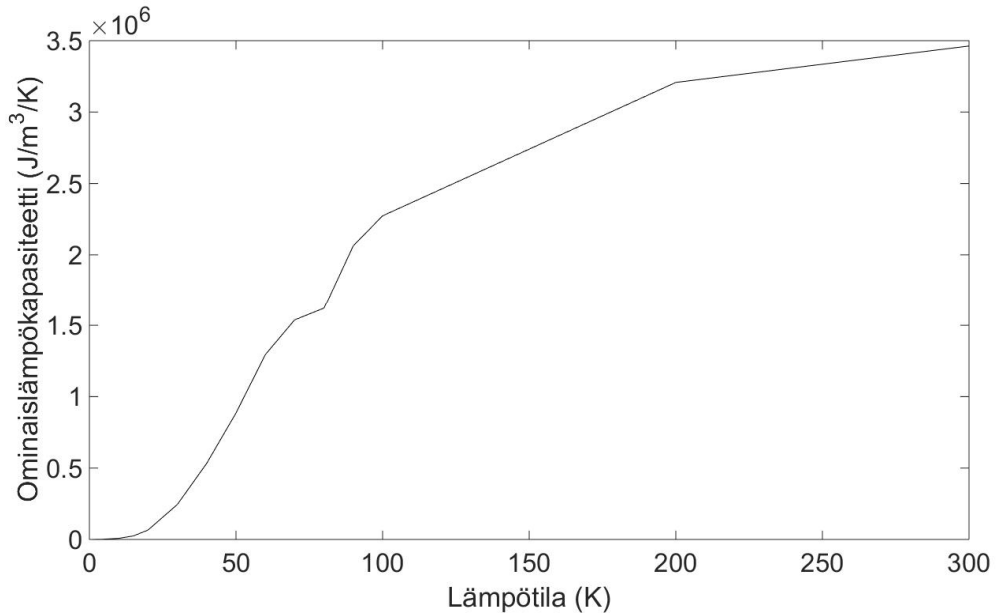
Suprajohtimessa käytetyillä materiaaleilla on suuri merkitys quenchin synnyn kannalta. Erittäin pienikin energiamäärä voi olla riittävä aikaansaamaan quenchin erityisesti adiabaattisissa magneeteissa, joissa käämitys on kontaktissa jäähdytysaineen kanssa ainoastaan ulkoreunansa kautta. Transientteihin häiriöihin liittyvien lyhyiden aikojen vuoksi jäähdytysaineella ei ole vaikutusta quenchin syntyyn, vaan sen määräävät ainoastaan suprajohtimen materiaalien paikalliset arvot. Suprajohtimissa käytettyjen materiaalien tärkeitä ominaisuuksia quenchin synnyn ja etenemisen kannalta ovat sen ominaislämpökapasiteetti, resistiivisyys ja lämmönjohtavuus.

3.1.1 Ominaislämpökapasiteetti

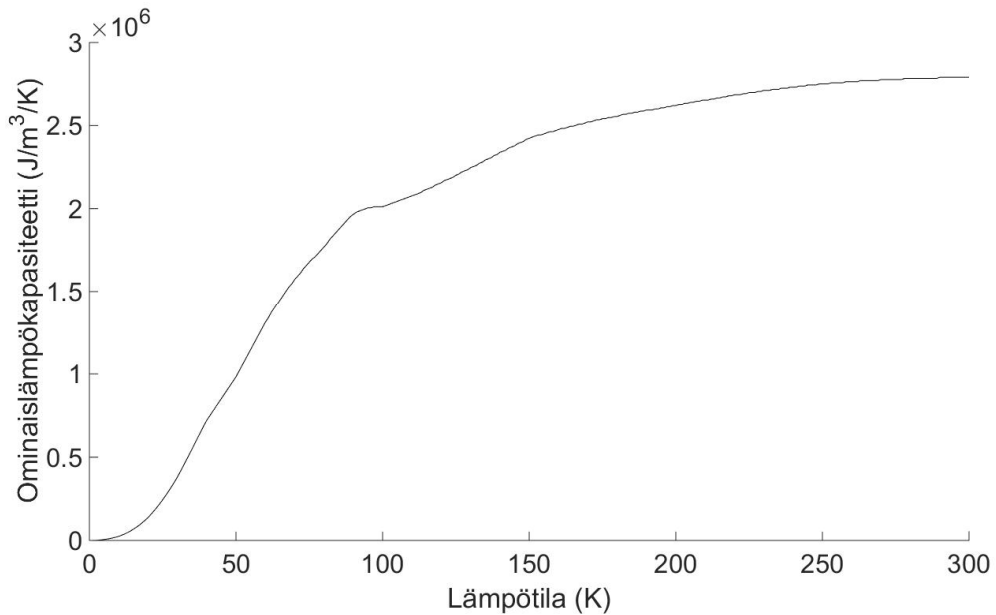
Ominaislämpökapasiteetti kuvaa aineeseen sitoutuvan lämpöenergian ja sen lämpötilan muutoksen välistä suhdetta. Se voidaan esittää esimerkiksi komposiittijohtimen eri materiaalien suhteutettuna keskiarvona, jolloin sen avulla voidaan määrittää johtimen paikallinen lämpötilan muutos siinä vapautuvan lämpöenergian seurauksena.

Ominaislämpökapasiteetti muuttuu lämpötilan funktiona ja se saa tyypillisesti pieniä arvoja matalissa lämpötiloissa. Erityisesti LTS-johtimissa sillä on suuri merkitys matalien käyttölämpötilojen vuoksi, sillä silloin pienikin häiriöenergia voi saada aikaan

quenchiin johtavan lämpötilan nousun. [2, s. 354.] Kuvissa 3.1 ja 3.2 on esitetty kuparin ja niobititaanin ominaislämpökapasiteetti tilavuusyksikköä kohti lämpötilan funktiona.



Kuva 3.1: Kuparin ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona [8].



Kuva 3.2: Niobititaanin ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona [8].

Niobititaanin ja kuparin ominaislämpökapasiteetit lähtevät jyrkempään kasvuun vasta noin 20 K:n lämpötilassa. Tämän vuoksi ne ovat erittäin alttiita lämpötilan muutoksille LTS-materiaalien käyttölämpötiloissa.

3.1.2 Resisttiivisyys

Suprajohtimen ominaisuuksista puhuttaessa resistiivisyydellä viitataan tyypillisesti sen matriisimetallin resistiivisyyteen. Suprajohtavassa tilassa virta kulkee kokonaan vastuksettomissa suprajohdesäikeissä. Osa virrasta alkaa kuitenkin kulkea myös matriisimetallissa, kun lähestytään kriittisiä arvoja erityisesti matalan n -arvon omaavissa suprajoh-teissa. Suprajohteen siirtyessä normaalitilaan sen resistiivisyys kasvaa suureksi, jolloin johtimen virta siirtyy kulkemaan matriisimetallissa. Matriisimetallin resistiivisyys mää-rää siinä generoituvien resistiivisten häviöiden suuruuden ja vaikuttaa siten osaltaan quenchin syntyyn ja normaalialueen leviämiseen. Kaavasta 2.4 nähdään, että resistiivi-syyden pieneneminen kasvattaa MPZ:n suuruutta. Stabiilisuuden kannalta matriisime-tallin resistiivisyyden halutaan olevan mahdollisimman pieni, mutta toisaalta se voi joh-taa helpommin suprajohdesäikeiden kytkeytymiseen johtimen kokeman magneettivuon muuttuessa.

Metallien resistiivisyys pienenee lämpötilan funktiona, minkä vuoksi matalien lämpöti-lojen yhteydessä puhutaan usein aineiden RRR-arvosta (*Residual Resistivity Ratio*). Se kuvaa metallin puhtausastetta ja se saadaan metallin huoneen lämpötilan ja matalan lämpötilan resistiivisyyden suhteena. Niin kutsutun Matthiessen säännön mukaan resis-tiivisyys voidaan esittää metallin epäpuhtauksista aiheutuvan resistiivisyyden ρ_0 ja läm-pötilasta riippuvan resistiivisyyden ρ_i summuna kaavan 3.1 mukaisesti. [2, s. 98.]

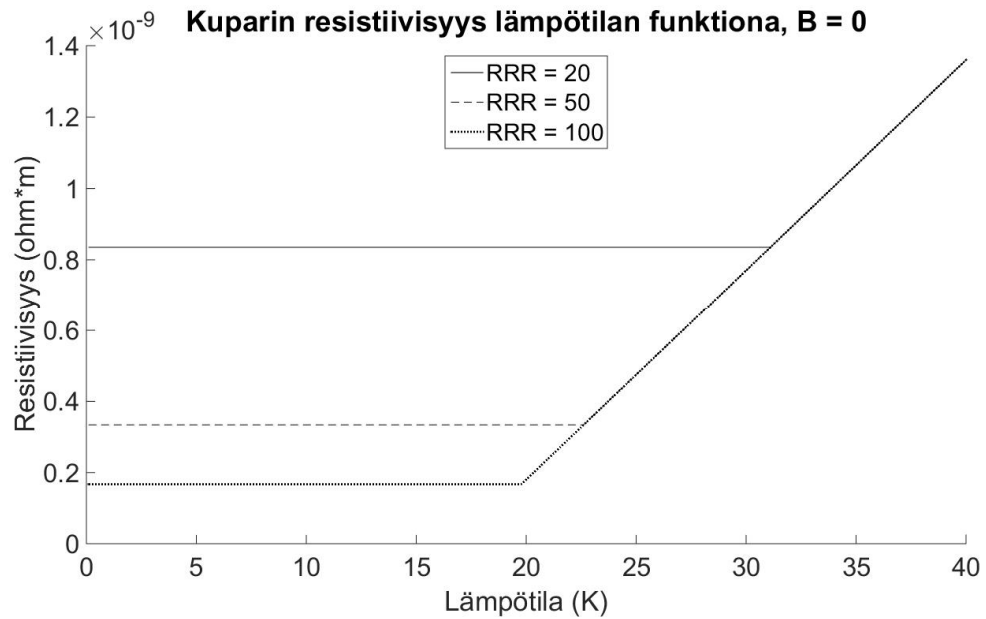
$$\rho(T) = \rho_0 + \rho_i(T) \quad (3.1)$$

Lisäksi metalleihin liittyy magnetoresistiivisyydeksi kutsuttu ilmiö, jonka seurauksena materiaalin resistiivisyys kasvaa siihen kohdistuvan magneettikentän vaikutuksesta. Erittäin matalan resistiivisyyden omaavan kuparin valmistaminen on kallista, ja sen tuomat edut heikkenevät erittäin paljon magnetoresistiivisyyden seurauksena. Tämän vuoksi suprajohdemagneettien sovelluksissa ei ole taloudellisesti kannattavaa käyttää erittäin suuren puhtausasteen omaavaa kuparia, sillä edullisemman vaihtoehdon käyttä-misellä ei ole suurta vaikutusta stabiilisuuteen. [2, s. 99 – 100.]

Pelkän metallin RRR-arvoa mitatessa matalan lämpötilan resistiivisyys pyritään mit-taamaan mahdollisimman lähellä absoluuttista nollapistettä. Mikäli matriisimetallin RRR-arvo mitataan valmiista suprajohtimesta, matalan lämpötilan on oltava suprajoh-teen kriittisen lämpötilan yläpuolella, jolloin virta kulkee kokonaan matriisissa. Niobiti-taanin kriittinen lämpötila on 9,2 K, jolloin matalan lämpötilan mittaaminen voitaisiin tehdä esimerkiksi 10 K:n lämpötilassa. Tällöin RRR-arvo saataisiin kaavasta 3.2.

$$RRR = \frac{\rho(300K)}{\rho(10K)} \quad (3.2)$$

RRR-arvon vaikutusta resistiivisyyteen erityisesti matalissa lämpötiloissa on havainno-listettu kuvassa 3.3.

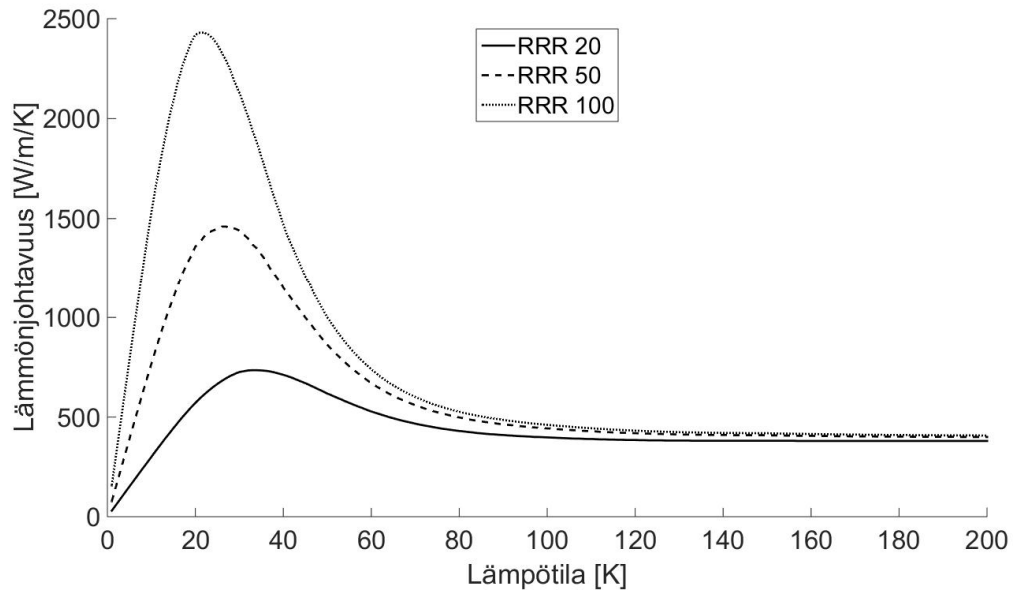


Kuva 3.3: Kuparin resistiivisyys RRR-arvoilla 100, 50 ja 20 ilman ulkoista magneettikenttää.

Kaavoista 2.4 ja 3.2 voidaan laskea, että esimerkiksi alle 20 K:n lämpötilassa RRR-arvolla 50 MPZ:n säde on noin 70 % RRR-arvon 100 vastaavasta säteestä.

3.1.3 Lämmönjohtavuus

Pienikin määrä lämpöenergiaa voi saada aikaan merkittävän lämpötilan nousun suprajohtimessa. Tällöin stabiilisuuden kannalta on tärkeää saada syntynyt lämpö johtumaan pois häiriöalueelta, jotta lämpötila tasaantuu mahdollisimman nopeasti lähelle suprajohtimen käyttölämpötilaa. Samoin kuin resistiivisyyden tapauksessa, suprajohtimen lämmönjohtavuudesta puhuttaessa viitataan tyypillisesti sen matriisimetallin arvoihin. Esimerkiksi 10 K:n lämpötilassa kuparin lämmönjohtavuus on noin 1500-kertainen niobitaaniin verrattuna, jolloin kuparin ominaisuudet dominoivat lämmönjohtavuutta johtimen pituussuunnassa [3, s. 355]. Kuvassa 3.4 on esitetty kuparin lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona eri RRR-arvoilla. Yli 100 K:n lämpötilassa lämmönjohtavuus tasaantuu lähes vakioarvoon, mutta LTS-sovellusten lämpötiloissa sen arvo vaihtelee erittäin paljon.



Kuva 3.4: Kuparin lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona RRR arvoilla 20, 50 ja 100. [8]

Hyvä lämmönjohtavuus voi saada häiriön aiheuttaman normaalialueen kutistumaan nopeammin kuin siinä generoituva lämpö kasvattaa sitä. Kuten kaavasta 2.4 nähdään, parempi lämmönjohtavuus kasvattaa MPZ:n sädettä. Lisäksi quenchin alettua lämmönjohtavuus vaikuttaa myös normaalialueen etenemiseen johdinta pitkin, mikä puolestaan vaikuttaa johtimen quench- parametreihin.

3.2 Quench- parametrit

Quench- tapahtumaan liittyy sitä kuvaavia parametreja. Niiden avulla voidaan kartoittaa suprajohdemagneetin käyttäytymistä quenchin aikana ja sen seurauksena. Quench- parametreja ovat normaalialueen etenemisnopeus, virran vaimenemiseen kuluva aika, käämin sisällä esiintyvä maksimijännite ja korkein lämpötila.

3.2.1 Normaalialueen etenemisnopeus

Normaalialueen etenemisnopeus NZP (*Normal Zone Propagation*) on merkittävä tekijä suprajohdemagneetin suojauksen kannalta. Se kuvaa quenchin aiheuttaneen normaalialueen kasvamisnopeutta resistanssissa syntyneen lämmön ja johtimen lämmönjohtavuuden ansiosta. Magneetin suojauksen kannalta on tärkeää saada normaalialueen etenemisnopeus suureksi, jotta magneetin virta vaimenee mahdollisimman nopeasti ja lämmön generoituminen leviää laajemmalle alueelle. Tällöin quenchin alkupisteessä esiintyvä korkein lämpötila pysyy mahdollisimman matalana.

Kokeellisesti on havaittu, että quenchin alkutilan transienttien jälkeen normaalialue etenee vakionopeudella v . Etenemisnopeus jaetaan johtimen pituussuuntaiseen komponent-

tiin v_l ja sitä vastaan kohtisuoraan kierrosten ja kerrosten väliseen komponenttiin v_t . Tässä mallinnuksessa transition suprajohtavan ja normaalitilan välillä on oletettu tapahtuvan kaavassa 3.4a esitettyssä lämpötilassa T_t , joka on keskiarvo kriittisestä lämpötilasta T_c ja virran jakautumislämpötilasta T_{cs} . [2, s. 204.] Virran jakautumislämpötila puolestaan on lämpötila, jossa johtimen kriittinen virta I_c on yhtä suuri käyttövirran I kanssa ja sen arvo voidaan määrittää kaavalla 3.3. [10; 3, s. 651]

$$T_{cs}(B, T, I) = T_c(0 T) \left(1 - \frac{B}{B_c(0 K)}\right)^{0,59} - \left[\left(T_c(0 T) \left(1 - \frac{B}{B_c(0 K)}\right)^{0,59} \right) - T \right] \frac{I}{I_c(0 T)} \quad (3.3)$$

LTS-johdinten käyttämissä matalissa lämpötiloissa, missä $(T_t - T_{op})/T_{op} \ll 1$, ominaislämpökapasiteetin C , resistiivisyyden ρ ja lämmönjohtavuuden k muutosta lämpötilan suhteen voidaan approksimoida käyttämällä niiden arvoja kaavassa 3.4b esitettyssä keskimääräisessä lämpötilassa T' . [3, s. 486.]

$$T_t = \frac{T_{cs} + T_c}{2} \quad (3.4a)$$

$$T' = \frac{T_t + T_{op}}{2} \quad (3.4b)$$

Tällöin normaalialueen etenemisnopeus voidaan esittää kaavan 3.5a avulla, missä alaindeksi m tarkoittaa matriisimetalliin liittyvää suuretta.

$$v_L = \frac{J_m}{C_{cd}(T')} \sqrt{\frac{\rho_m(T') k_m(T')}{T_t - T_{op}}} \quad (3.5a)$$

Wiedemann-Franzin lain mukaan resistiivisyyden, lämmönjohtavuuden ja lämpötilan välillä on yhteys $\rho(T)k(T) = L_0 T$, missä L_0 on Lorenzin luku ja $L_0 = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ W}\Omega\text{K}^{-2}$. Tällöin normaalialueen etenemisnopeus voidaan esittää vaihtoehtoisella tavalla kaavan 3.5b mukaisesti. [2, s. 206]

$$v_L = \frac{J_m}{C_{cd}(T')} \sqrt{\frac{L_0 T'}{T_t - T_{op}}} \quad (3.5b)$$

Suprajohdekäämissä normaalialue voi levitä johtimen pituussuuntaan nähden kohtisuoraan johdinkierroksesta ja -kerroksesta toiseen. Tätä etenemistä kuitenkin hidastaa kierrosten välinen eristys ja etenemisnopeuksien suhdetta merkitään termillä α . Eristyksen vaikutusta poikittaissuuntaiseen normaalialueen etenemiseen voidaan huomioida keskimääräisellä ominaislämpökapasiteettien suhteella. Kaavassa 3.6 C_{av} on poikkileikkauksen kaikkien osien ja C_{avm} sen metallisten osien ominaislämpökapasiteettien keskiarvo. Termit k_l ja k_t puolestaan ovat käämin johtimen suuntainen ja sitä vastaan kohtisuora lämmönjohtavuus. [2, s. 208.]

$$\alpha = \frac{v_t}{v_l} = \frac{C_{avm}}{C_{av}} \sqrt{\frac{k_t}{k_l}} \quad (3.6)$$

Koska normaalialue kasvaa tyypillisesti nopeammin johtimen pituussuunnassa kuin sitä vastaan kohtisuorassa, normaalialueen voidaan hahmottaa olevan ellipsoidin muotoinen.

3.2.2 Virran vaimeneminen ja vaimenemisaika

Quenchin alettua suprajohdekäämin sisäinen resistanssi kasvaa normaalialueen levites-
sä, minkä seurauksena magneetin virta alkaa vaimeta. Virran vaimenemiseen kuluva
aika t_Q on yksi tärkeistä quench- parametreista. Sen arvoa voidaan approksimoida teke-
mällä tiettyjä oletuksia. Johtimen virrantiheyden oletetaan pysyvän alkuarvossaan J_0
kunnes kaikki varastoitunut energia on purkautunut, jolloin virta putoaa nolnaan. [2, s.
209.]

Kaavoissa 3.7 – 3.8 esitetyn suojausfunktion $U(T)$ avulla voidaan määrittää virran vai-
menemisesta aiheutuva johtimen lämpötilan nousu. Suojausfunktion ominaislämpöka-
pasiteetti C määrää johtimessa generoituvan lämmön ja lämpötilan muutoksen välisen
suhteen, ja resistiivisyys ρ vaikuttaa virran J vaimenemisen aiheuttaman generoituneen
lämmön määrään. Suojausfunktio U kuvaa siis yhdessä johtimen sähköisiä ja termisiä
ominaisuuksia. Kaavassa 3.8 on approksimoitu U :n muutosta lämpötilan funktiona. Re-
ferenssilämpötila T_r voidaan valita mielivaltaisesti, mutta tarkkuuden vuoksi sen arvo
tulisi pyrkiä valitsemaan oletetun maksimilämpötilan suuruusluokkaan. Mikäli mallilla
määritetty maksimilämpötila poikkeaa paljon referenssilämpötilasta, kaavan 3.8 mukai-
sen U :n lämpötilariippuvuuden epätarkkuus kasvaa, ja laskuista tulisi suorittaa toinen
iteraatio paremmin valitulla T_r :n arvolla. [2, s. 218.]

$$U(T) = \int_{T_0}^T \frac{c(T)}{\rho(T)} dT \quad (3.7a)$$

$$U(T) = \int_0^\infty J^2(t) dt = J_0 t_Q \quad (3.7b)$$

$$U(T) \approx U(T_r) \sqrt{\frac{T}{T_r}} \quad (3.8)$$

Lisäksi resistiivisyyden oletetaan muuttuvan lineaarisesti lämpötilan suhteen. [2, s.
209.]

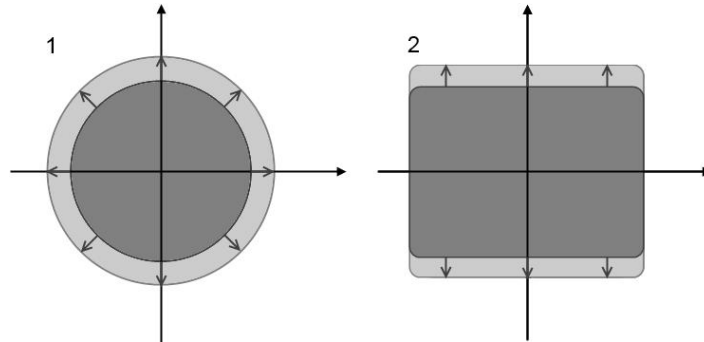
Näiden oletusten mukaan solenoidi magneetin quenchiin kuluva aika t_Q sekunteina saa-
daan kaavasta 3.9, missä U_r ja ρ_r ovat funktion U ja resistiivisyyden ρ arvot mielivaltai-
sesti valitussa referenssilämpötilassa T_r , L on magneetin induktanssi, A on johtimen
poikkipinta-ala, α on kaavan 3.6 mukainen normaalialueen etenemisnopeuksien suhde ja
 v on normaalialueen johtimen pituussuuntainen etenemisnopeus. Sen avulla voidaan
arvioida tarkemmin eri tilanteissa quenchiin kuluva aikaa, sekä virran todellista käy-
rämuotoa sen aikana. [2, s. 210.]

$$t_Q = \left(\frac{90L U_r^2 A^2}{4\pi J_0^4 \rho_r \alpha^2 v^3} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (3.9)$$

Virran vaimenemisaikaa määritettäessä virrantiheyden oletettiin pysyvän vakiona quen-
chin ajan. Virran todellista käyrämuotoa voidaan approksimoida paremmin kaavan 3.10
mukaisella yhtälöllä tilanteessa, jossa normaalialueen leviäminen ei quenchin aikana
kohtaa rajoituksia.

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{t_Q}\right)^6\right) \quad (3.10)$$

Normaalialueen leviäminen voi kuitenkin käytännössä kohdata rajoituksia, jolloin todellinen virran vaimenemiseen kuluva aika t_d on suurempi kuin t_Q . Näitä rajoja ovat esimerkiksi solenoidikäymissä normaalialueen leviäminen käämin sisä- tai ulkopintaan, ylä- tai alareunaan tai normaalialueen kohdatessa itsensä sen levitessä täyden kierroksen käämin johtimen suuntaisesti. [2, s. 210.] Kuvassa 3.5 on hahmotettu rajoitusten vaikutusta normaalialueen etenemiseen.



Kuva 3.5: Normaalialueen eteneminen sen kohdattua rajoitus yhdessä (kohta 1) ja kahdessa (kohta 2) ulottuvuudessa. Vasemmanpuoleisessa kohdassa 1 normaalialue on rajoitettu z -akselin suunnassa eli tasoon ja siitä pois päin. Oikeanpuoleisessa kohdassa 2 normaalialue on rajoitettu lisäksi x -akselin suunnassa, jolloin se etenee y -akselin suuntaisen poikkileikkauksen muotoisena tasona.

Ellipsoidin muotoisena kasvava normaalialue kohtaa rajan eri ulottuvuuksissa ajanhetkillä t_a , t_b ja t_c . Oletetaan, että niiden arvot ovat paljon t_Q :ta pienempiä, jolloin virran vaimenemiseen kuluva aika voidaan arvioida yksinkertaistetusti.

Yhdessä ulottuvuudessa rajan kohtaava normaalialue leviää kasvavasäteisenä sylinterinä ja quenchin alkupiste on sen ytimessä. Tässä tilanteessa virran vaimenemiseen kuluva aika saadaan kaavalla 3.11. Virran vaimeneminen puolestaan noudattaa arviolta kaavan 3.12 mukaista yhtälöä. [2, s. 212.]

$$t_d = \left(\frac{t_Q^6}{3t_a}\right)^{\frac{1}{5}} \quad (3.11)$$

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{t_d}\right)^5\right) \quad (3.12)$$

Kahdessa ulottuvuudessa rajoitettu normaalialue jatkaa kasvuaan kolmannen ulottuvuuden poikkileikkauksen muotoisena tasona. Esimerkiksi poikkileikkaukseltaan pyöreässä rakenteessa normaalialue kasvaa rajoituksen jälkeen sen poikkipinta-alan suuruisena kiekkona. Tällöin virran vaimenemiseen kuluva aika on edellistä tilannetta pidempi, ja sen arvon approksimaatio saadaan kaavasta 3.13, jos rajat kohdataan ajanhetkillä t_a ja t_b . Vastaavasti vaimenevan virran käyrämuoto saadaan kaavasta 3.14. [2, s. 215.]

$$t_d = \left(\frac{2t_Q^6}{15t_a t_b}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.13)$$

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{t_d}\right)^4\right) \quad (3.14)$$

Kolmessa ulottuvuudessa rajoitetun normaalialueen resistanssi kasvaa ainoastaan sen lämpötilariippuvuuden ansiosta. Tässä tilanteessa virran vaimeneminen on hitainta, ja siihen kuuluva aika voidaan arvioida kaavalla 3.15 ja virran käyrämuotoa hahmottaa kaavalla 3.16. Normaalialue kohtaa rajat ajanhetkellä t_a , t_b ja t_c . [2, s. 216.]

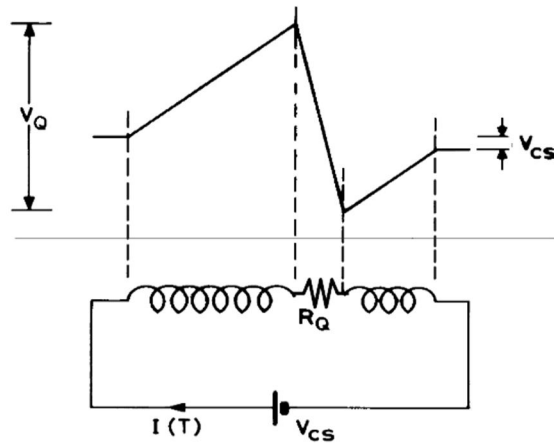
$$t_d = \frac{t_Q^2}{(20t_a t_b t_c)^{\frac{1}{3}}} \quad (3.15)$$

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{t_d}\right)^3\right) \quad (3.16)$$

Vaikka edellä esitetyssä mallissa on tehty paljon yksinkertaistuksia ja approksimaatioita, sen tuloksia voidaan käyttää ainakin suuntaa-antavana arviona. Vielä tarkempiin tuloksiin päästään käyttämällä tarkempia malleja ja numeerisia menetelmiä hyödyntäviä mallinnusohjelmia. [2, s. 218.]

3.2.3 Maksimijännite

Suprajohtavan magneetin virran kasvattamiseen voidaan käyttää pientä jännitettä, ja magneetin sisäiset jännitteet ovat käytännössä olemattomia suprajohteen resistanssin ollessa nollassa. Suprajohdekäämin sisällä voi kuitenkin esiintyä korkeita jännitteitä magneetin energian purkautuessa. Quenchin aikana magneetin suuri virta kulkee resistiivisen normaalialueen läpi, jolloin käämin sisällä esiintyy jännite. Käämin induktanssissa virran muutosta vastustava jännite on kuitenkin merkittävä vastakkainen, jolloin käämin navoissa ei välttämättä näy suurta jännitettä. Navoissa voi esiintyä esimerkiksi pieni virtalähteen syöttöjännite tai suojausvastuksen yli muodostuva suuri jännite, joka on tärkeä tekijä suojausta suunniteltaessa [6, s. 2]. Kuva 3.6 havainnollistaa normaalialueen resistanssin R_Q yli olevan jännitteen V_Q ja navoissa esiintyvän jännitteen V_{cs} muodostumista.



Kuva 3.6: Quench-jännitteen muodostumista kuvaava käyrämuoto ja sijaiskytkentä. [2, s. 203]

Vaikka quenchin alettua normaalialueen koko ja siten myös sen resistanssi kasvaa, samalla myös käämissä kulkeva virta vaimenee. Tämän seurauksena käämin sisällä esiintyvä jännite nousee tyypillisesti huippuarvoonsa quenchin alkupuolella ja laskee sen jälkeen virran vaimetessa. [2, s. 203 – 204.]

Edellä virran vaimenemisen käyrämuodon approksimointiin käytettyä mallia voidaan hyödyntää myös suurimman sisäisen jännitteen määrittämiseen. Oikosuljetun käämin induktanssin yli muodostuvan induktiivisen jännitteen on oltava yhtä suuri, mutta vastakkaismerkkinen kuin resistiivisen normaalialueen yli muodostuva jännite. Magneetin induktanssin yli oleva jännite eri tilanteissa saadaan kaavasta 3.17 käyttämällä virran yhtälöitä 3.10, 3.12, 3.14 ja 3.16. Suojauksen kannalta kiinnostava jännitteen huippuarvo quenchin aikana saadaan hakemalla jännitteen funktion maksimi-arvo. [2, s. 210 – 216.]

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (3.17)$$

Quenchin ajan rajatta kasvavan normaalialueen yli olevan jännitteen maksimi-arvo saadaan yhtälöstä 3.18.

$$V_{max} \approx \frac{2LI_0}{t_Q} \quad (3.18)$$

Normaalialueen, jonka kasvu rajoittuu yhdessä ulottuvuudessa ajanhetkellä t_a , yli oleva suurin jännite saadaan kaavasta 3.19.

$$V_{max} \approx \frac{2LI_0}{t_Q} \left(\frac{t_a}{t_Q} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (3.19)$$

Kahdessa ulottuvuudessa ajanhetkillä t_a ja t_b rajoittuvan normaalialueen yli oleva maksimijännite on kokoluokaltaan kaavan 3.20 mukainen.

$$V_{max} \approx \frac{2.1LI_0}{t_Q} \left(\frac{t_a t_b}{t_Q^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.20)$$

Kolmessa ulottuvuudessa, ajanhetkillä t_a , t_b ja t_c , rajoitetun normaalialueen yli olevaa maksimijännitettä voidaan approksimoida kaavalla 3.21.

$$V_{max} \approx \frac{2.5LI_0}{t_Q^2} (t_a t_b t_c)^{\frac{1}{3}} \quad (3.21)$$

Kaavasta 3.18 – 3.21 nähdään huippujännitteen riippuvan quenchiin kuluva ajasta t_Q . Kaavassa 3.18 se on kääntäen verrannollinen t_Q :n arvoon nähden ja kaavassa 3.21 huippujännite on kääntäen verrannollinen t_Q :n neliöön. Siitä huolimatta kyseinen aika on tärkeää saada mahdollisimman lyhyeksi quenchin aikana syntyvän lämmön vuoksi.

3.2.4 Hot spot- lämpötila

Quenchin alettua suprajohteessa generoituu lämpöä. Normaali alueen etenemisen ansiosta lämmön generoituminen jakaantuu jatkuvasti laajenevalle alueelle esimerkiksi suprajohdekäämin sisällä. Siitä huolimatta quenchin alkupiste altistuu lämmön generoitumiselle koko quenchin ajan, minkä johdosta korkein, niin sanottu hot spot- lämpötila esiintyy tyypillisesti juuri quenchin alkupisteessä. Koska quenchiin liittyvä virran vaimenemisaika on lyhyt erityisesti pienissä magneeteissa, hot spot- lämpötilan arvioimiseksi tilannetta voidaan pitää adiabaattisena. Mikäli magneetin ja ympäristön välillä tapahtuu merkittävää lämmön siirtymistä, todellinen hot spot- lämpötila on matalampi kuin adiabaattisen oletuksen antama tulos. Siinä tapauksessa käytetty malli on siis epätarkka, mutta virhe tapahtuu suojauksen kannalta turvalliseen suuntaan. [2, s. 201.]

Todennäköinen quenchin alkupiste on magneetin suurimman vuontiheyden alueella. Siellä johtimeen kohdistuva Lorentz-voima on suurimmillaan ja siten esimerkiksi eristeen murtuminen on todennäköisintä. Myös kriittisen virran ja lämpötilan arvot ovat pienimmillään, jolloin energiamarginaali normaalitilaan siirtymiseen on pieni.

Edellä käytetystä mallista voidaan määrittää approksimaatio hot spot- lämpötilalle T_m . Quenchin ajan rajatta kasvavan normaali alueen tapauksessa suurin lämpötilan nousu quenchin alkupisteessä saadaan kaavasta 3.22. [2, s. 210.]

$$T_m = \frac{J_0^4 t_Q^2 T_r}{U_r^2} \quad (3.22)$$

Mikäli kasvava normaali alue kohtaa quenchin aikana rajoituksia, hot spot- lämpötilan määrittämiseksi tulee laskea tilanteeseen sopiva virran vaimenemisaika t_d ja sijoittaa se kaavaan 3.23. [2, s. 213.]

$$T_m = \frac{J_0^4 t_d^2 T_r}{U_r^2} \quad (3.23)$$

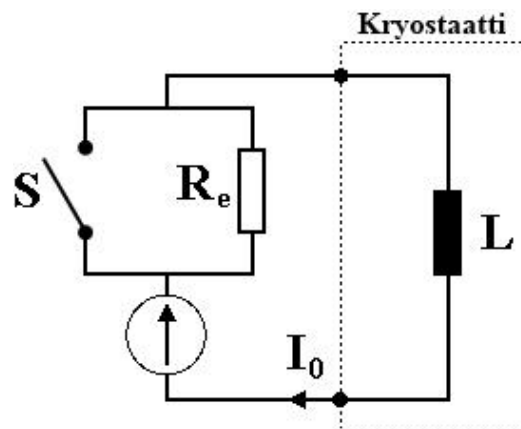
Hot spot- lämpötila siis kasvaa suhteessa virran vaimenemiseen kuluvan ajan neliöön. Tarkemman tuloksen saamiseksi hot spot- lämpötilan laskemisessa tulee suorittaa toinen iteraatio, mikäli kaavasta 3.23 saatu arvo on kaukana referenssilämpötilasta T_r . Kaavassa 3.8 esitetty suojausfunktion U riippuvuus lämpötilasta on epätarkka suurilla lämpötilaväleillä, jolloin referenssilämpötilan valitseminen lähemmäs aiemmin laskettua hot spot- lämpötilaa parantaa tarkkuutta. [2, s. 218.]

3.3 Suprajohdekäämin suojaus

Suurten energiatiheyksien omaavissa magneeteissa quench ei tapahdu turvallisesti ilman erillistä suojausta. Mahdollisia quenchin aiheuttamia vahinkoja ovat ylikuumenemisen aiheuttama johtimen vaurioituminen tai tuhoutuminen sekä korkeiden jännitteiden aiheuttamat läpilyönnit tai muut turvallisuusriskit. Magneetin suojaukseen on kehitetty erinäisiä menetelmiä, joilla näiltä vaaratilanteilta voidaan välttyä. Tarkastellut suojausmenetelmät ovat ulkoinen suojausvastus, induktiivisesti kytketty toisiokäämi, käämin jako osakomponentteihin sekä suojauslämmitin.

3.3.1 Suojausvastus

Suojausvastuksen tarkoituksena on kuluttaa osa magneettiin varastoituneesta energiasta ja siten pienentää quenchin hot spot- lämpötilaa. Sijoittamalla suojausvastus kryostaatin ulkopuolelle voidaan myös vähentää jäähdytysaineen kiehumaa, mikä pienentää osaltaan käyttökustannuksia. Magneetin normaalissa toimintatilassa suljettu kytkin antaa virralle reitin suojausvastuksen ohii. Kun quench havaitaan, kytkin avataan ja magneetin virta kulkee suojausvastuksen läpi. [2, s. 219 – 220.]



Kuva 3.7: Esimerkkikytkentä suojausvastuksella R_e suojatusta käämistä. Katkaisija S avataan jos käämissä havaitaan resistanssia, jolloin virta kulkee vastuksen R_e läpi.

Suojausvastuksen yli oleva jännite tulee huomioida suojausta suunniteltaessa. Kytkimen avauduttua vastuksen R_e läpi kulkee virta I_0 , jolloin vastuksen ja kytkimen yli muodostuu jännite $V_e = R_e I_0$. Suurin sallittu jännite rajoitetaan yleensä kilovolttien kokoluokkaan [2, s. 219; 6, s. 2] ja kytkimen on luonnollisesti kyettävä katkaisemaan virta I_0 . Suojausvastuksen käytön haasteena on quenchin nopea havaitseminen. Suojauksen tulee havaita quenchin aiheuttama resistiivinen jännite magneetin sisällä, mutta se ei saa toimia virheellisesti esimerkiksi virtalähteen vaihtelun aiheuttaman induktiivisen jännitteen vaikutuksesta. [2, s. 220.]

3.3.2 Induktiivinen toisiokäämi

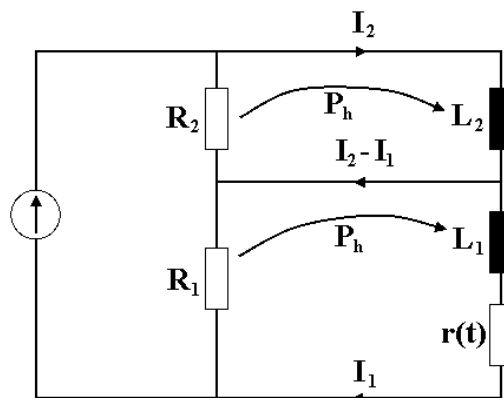
Suprajohdekäämiin voidaan kytkeä induktiivisesti toinen oikosuljettu tai vastuksen kanssa sarjaan kytketty käämi. Tällöin virran muutos magneetissa indusoi virran toisiokäämiin, jolloin osa magneetin energiasta kuluu toisiopiirissä [2, s. 221]. Suojaus toimii passiivisesti, eli sen toiminta ei vaadi erillistä ohjausta.

Toisiokäämi voi myös nopeuttaa magneetin quenchin etenemistä, jos se on hyvässä termisessä kontaktissa magneetin käämin kanssa. Quenchin aikana toisiokäämissä kulkeva virta lämmittää sitä, jolloin lämpöä johtuu myös suprajohdekäämiin ja normaali-alueen etenemisnopeus kasvaa. Tämä ilmiö tunnetaan nimellä *quench-back*. Se voi olla erityisen hyödyllinen tilanteissa joissa quenchin leviäminen kohtaa rajoituksia pian sen alkamisen jälkeen ja eteneminen muissa ulottuvuuksissa on hidasta. [2, s. 222.]

Toisiokäämin käyttämisen haittapuolena ovat magneetin virran kasvattamisen aikaiset häviöt, jotka rajoittavat virran kasvattamisnopeutta ja tuovat ylimääräistä lämpökuormaa kryostaattiin [2, s. 244].

3.3.3 Käämin jako osakomponentteihin

Suprajohdekäämiä voidaan suojata jakamalla se osiin. Käämin osakomponenttien rinnalle kytketään vastuksia, joiden läpi ei kulje virtaa normaaleissa käyttöolosuhteissa. Kun quenchin aikana käämin osiossa esiintyy resistanssia, kyseisen osion läpi kulkeva virta vaimenee ja siirtyy kulkemaan sen rinnalla olevan vastuksen läpi. Tällöin virran vaimenemiseen liittyvä induktanssi on koko magneetin sijaan ainoastaan osakomponentin induktanssi. [2, s. 227.]



Kuva 3.8: Kahteen osaan jaetun magneetin sähköistä kytkentää havainnollistava kuva. Käämin 1 resistanssin $r(t)$ kasvaessa virta I_1 vaimenee ja $(I_2 - I_1)$ kasvaa.

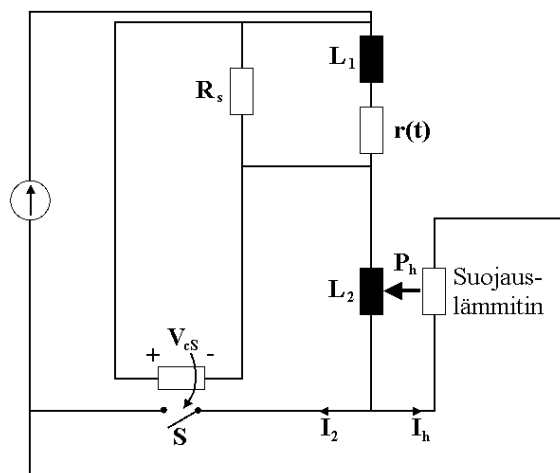
Jakamalla käämi osakomponentteihin voidaan vaikuttaa pääasiassa magneetin quenchin aikaiseen jännitteeseen. Quenchin etenemisnopeutta voidaan kasvattaa osakomponenteilla suojatussa magneetissa liittämällä vastukset käämin osiin termisesti. Tällöin vastuksessa generoituva lämpö johtuu käämin johtimeen ja nopeuttaa normaali-alueen ete-

nemistä, jolloin suojauksessa käytetään *quench-back* periaatetta. Kuvassa 3.8 resistanssien R_1 ja R_2 läpi kulkeva virta lämmittää vastaavaa käämiä teholla P_h . [2, s. 228.]

3.3.4 Suojauslämmitin

Quench-back periaatetta voidaan hyödyntää suojauksessa myös käämien lämmittimien muodossa. Normaalialueen etenemistä ja virran vaimenemista pyritään nopeuttamaan siirtämällä suurempi osa tai koko käämi resistiiviseen tilaan lämmittimien avulla. Lämmittimet voidaan sijoittaa suojauksen kannalta optimaalisiin paikkoihin. [3, s. 504.]

Suojauslämmittimien ohjaaminen voidaan tehdä aktiivisesti, jolloin quench on ensin havaittava ja sen lämmittimet aktivoitava sen tiedon perusteella. Lämmitin voidaan aktivoida myös passiivisesti esimerkiksi siten, että käämissä esiintyvä resistanssi ohjaa osan virrasta rinnankytkettyyn vastukseen osakomponentteihin jakamisen tapaan. Käämin tai sen osan yli muodostuvalla jännitteellä voidaan ohjata katkaisijaa, jonka aukeaminen ohjaa magneetin käyttövirran lämmittimiin. [3, s. 504 – 505.] Kuvassa 3.9 on esitetty suojauslämmittimen toimintaperiaate.



Kuva 3.9: Yksi mahdollinen suojauslämmittimen kytkentä.

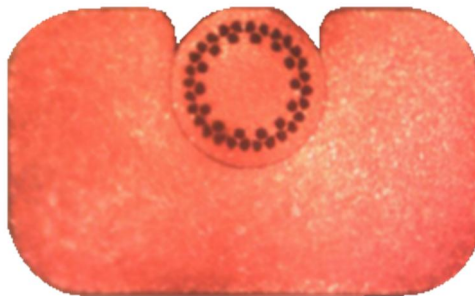
Kuvassa 3.9 kahteen osaan jaetussa käämissä resistanssin esiintyminen osassa 1 saa aikaan jännitteen V_{cs} . Kytkin S ohjataan aukeamaan jännitteen V_{cs} kasvaessa, jolloin käämien käyttövirta ohjautuu suojauslämmittimeen. Suojaus on siis passiivinen, sillä jännitteen muodostuminen käämin L_1 yli ohjaa lämmittimen toimintaa suoraan, eikä se vaadi erillistä havaitsemista. Kyseisessä kytkennässä suojauslämmitin lämmittää käämin osaa 2 teholla P_h .

4. SOLENOIDIMAGNEETIN QUENCH- ANALYYSI

Quench- analyysillä pyritään selvittämään suprajohtimesta valmistetun magneetin käyttäytymistä quenchin aikana ja sen suojauksen tarvetta tai toimivuutta. Kappaleessa 3 esitetyissä quench- parametrien kaavoissa tehtiin paljon yksinkertaistuksia, minkä vuoksi tulokset voivat olla epätarkkoja, mutta silti suuntaa-antavia. Tietokoneohjelmien ja numeerisen analyysin avulla mallista voidaan luoda tarkemmin todellista tilannetta vastaava ja siten tuloksia voidaan pitää luotettavampina. Tarkkojen tulosten saavuttamiseksi on luonnollisesti tunnettava hyvin magneetin käyttöolosuhteet sekä käytetyn suprajohtimen tekniset ominaisuudet.

4.1 ”Wire-in-channel”- johtimet

Tässä työssä käytetyt johtimet ovat variaatioita Luvata Oy:n valmistamasta ”wire-in-channel” (WIC) johtimesta. Kyseisessä johdintyypissä pyöreä suprajohtava komposiittijohdin sijaitsee kuparisessa kanavassa kuvan 4.1 esittämällä tavalla.



Kuva 4.1: Poikkileikkaus työssä käytetystä Luvata Oy:n valmistamasta WIC-johtimesta. Kuvan johtimen dimensiot ovat 1,972 mm x 1,169 mm, ja ydinlangan halkaisija on 0,65 mm. [4]

Johtimen ydinlanka koostuu kuparimatriisiin upotetuista niobititaanisäikeistä tavallisen komposiittijohtimen tapaan ja se voi olla sähköisesti eristetty kuparikanavasta johdintyypistä riippuen. Kuparikanavan kulmien pyöristämisessä on käytetty 0,3 mm kaarevuussädettä, ja koko johtimen alfa-arvo eli poikkileikkauksen kuparin osuuden suhde suprajohteen osuuteen on noin 29. Kuparin RRR-arvoksi on ilmoitettu noin 100. Tässä työssä käytetään kolmea eri variaatiota kyseisestä WIC-johtimesta.

Ensimmäisessä variaatiossa (Optio 1) magneetti käämitään WIC-johtimesta sellaisenaan, jolloin kuparikanava on suoraan sähköisessä kontaktissa viereisten kerrosten ja kierrosten kuparikanavien kanssa. Toisessa variaatiossa (Optio 2) kuparikanava pääl-

lystetään ohuella eristekerroksella, jolla pyritään vähentämään virran kasvattamisen yhteydessä kupariin muodostuvia pyörrevirtoja. Optioissa 1 ja 2 ydinlanka on sähköisesti eristetty kuparikanavasta. Viimeisessä variaatiossa (Optio 3) WIC-johdin on eristetty PET-eristeellä ja ydinlankaa ei ole eristetty sähköisesti kuparikanavasta.

Kaikki kolme magneettia valmistetaan niin kutsutulla *wet layer*-menetelmällä, mikä tarkoittaa että johdinkerrosten väliin lisätään kerros Stycast 2850 FT -epoksia. Tämän vuoksi johdinkerrosten ja -kierrosten väliin jää kerros epoksia, mikä estää johtimen liikettä Lorentz-voimien vaikutuksesta, mutta toisaalta vaikuttaa käämin sisäiseen lämmön- ja sähkönjohtavuuteen. Tarkkaa epoksikerroksen paksuutta on vaikea arvioida ja se todennäköisesti vaihtelee eri kerrosten ja kierrosten välillä.

4.1.1 Optio 1 – Eristämätön johdin

Johdinoption 1 poikkileikkauksen nimellinen leveys on 1,972 mm ja korkeus 1,169 mm. Ydinlankana käytetään halkaisijaltaan 0,6 mm:n paksuista ja kuparikanavasta Formvar:lla eristettyä komposiittijohdinta. Ydinlangan eristekerros on paksuudeltaan noin 10 μm .

4.1.2 Optio 2 – Päällystetty johdin

Optiossa 2 johtimen dimensiot ovat noin 20 – 30 μm suuremmat ohuen päällystekerroksen ansiosta, jolloin sen nimellinen leveys on 2,002 mm ja korkeus 1,199 mm. Samoin kuin Optiossa 1, ydinlangan ja kuparikanavan välillä on Formvar-eriste, jonka paksuus on noin 10 μm .

4.1.3 Optio 3 – PET-eristetty johdin

Option 3 dimensiot ovat kahta muuta johdintyyppiä suuremmat, koska johdinta ympäröivä sukkamainen PET-eriste kasvattaa sen poikkipinta-alaa. Eristeen paksuus on noin 140 μm , ja koko johtimen nimellinen leveys on 2,240 mm ja korkeus 1,458 mm. Ydinlankana käytetään paksumpaa, halkaisijaltaan 0,65 mm:n suprajohdinta, jota ei ole eristetty kuparikanavasta.

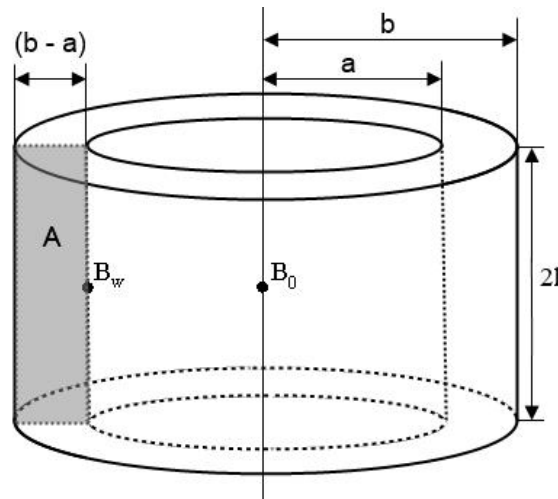
4.2 Koemagneetin rakenne

Työssä käytetyt magneetit valmistetaan kuvassa 4.2 esitetyllä tavalla solenoidien muotoon. Solenoidin keskellä kulkeva magneettivuon tiheys B_0 voidaan laskea käämin virrantiheyden J , sekä käämin geometriasta riippuvien apumuuttujien a ja β avulla. Apumuuttujien arvot saadaan kaavoista 4.1 ja 4.2, joissa a on solenoidikäämin sisäsäde, b ulkosäde ja l käämin korkeuden puolikas. [2, s. 21.] Käämin virrantiheys saadaan käytetyn virran I ja käämin kierrosten lukumäärän N_{tot} tulon ja koko käämin poikkipinta-alan

A osamääränä $J = N_{tot}I/A$. Tällöin poikkipinta-alassa huomioidaan siis suprajohteen lisäksi myös matriisimetalli, eristys, kylläste sekä muut mahdolliset komponentit. [3, s. 359.]

$$\alpha = \frac{b}{a} \quad (4.1)$$

$$\beta = \frac{l}{a} \quad (4.2)$$



Kuva 4.2: Solenoidimagneetin mittoja a , b ja l , poikkipinta-alaa A sekä magneettivuon tiheyksien B_w ja B_0 sijaintia havainnollistava kuva.

Apumuuttujien avulla solenoidikämmille voidaan laskea muotokerroin $F(\alpha, \beta)$ kaavasta 4.3, missä μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti ja $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ H/m}$.

$$F(\alpha, \beta) = \mu_0 \beta \ln\left(\frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}}\right) \quad (4.3)$$

Muotokertoimen F avulla magneettivuon tiheys B_0 voidaan laskea kaavasta 4.4. [2, s. 20.]

$$B_0 = JaF(\alpha, \beta) \quad (4.4)$$

Solenoidimagneetissa suurin magneettivuon tiheys B_w esiintyy käämin sisäosalla sen korkeuden puolessavälissä. Kaavassa 4.5 esitetty suhde δ riippuu magneetin geometriasta.

$$\delta(\alpha, \beta) = \frac{B_w}{B_0} \quad (4.5)$$

Suprajohteen näkökulmasta suhde tulisi saada mahdollisimman lähelle arvoa 1, jolloin magneetin sovelluksessa hyödynnettävä magneettivuon B_0 olisi yhtä suuri kuin käämityksen kriittiseen virtaan vaikuttava suurin magneettivuon tiheyden arvo B_w . Suhde δ on voitu määrittää numeerisesti muotokertoimen $F(\alpha, \beta)$ sekä apumuuttujien α ja β avulla. [3, s. 75 – 76.]

Litteissä ja leveissä eli pienten α - ja β -arvojen omaavissa käämeissä suhde δ on suuri, jolloin käämiin kohdistuva B_w :n arvo pienentää merkittävästi kriittisen virrantiheyden J_c arvoa ja siten suurinta mahdollista hyödynnettävää B_0 :n arvoa [2, s. 22]. Toisaalta optimaalisen δ arvon saavuttamiseksi esimerkiksi käämin korkeuden kasvattaminen lisää myös vaadittavan suprajohteen määrää ja kasvattaa siten taloudellisia kustannuksia.

Valmiiden koemagneettien mitat, laskettu johtimen kokonaispituus l_{tot} ja niiden perusteella laskettu induktanssin arvo on esitetty taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1: Työssä käytettyjen koemagneettien dimensiot ja niiden perusteella lasketut induktanssit.

Johdin	a (mm)	b (mm)	2l (mm)	N_{tot}	l_{tot} (m)	L (mH)
Optio 1	19,8	51,5	59,1	720	154,8	19,3
Optio 2	19,8	51,5	59,1	720	154,8	19,3
Optio 3	19,8	57,3	65,3	720	155,9	20,6

Käämi 3 poikkeaa dimensioiltaan kahdesta muusta käämistä, jolloin myös sen ominaisuudet ovat erilaiset. Myös käämissä 3 käytetty johdintyyppi eroaa kahdesta muusta merkittävästi sen eristysmateriaalin ansiosta, minkä vuoksi sen ominaisuuksien voidaan olettaa poikkeavan käämeistä 1 ja 2.

4.3 Käämien virrat

Taulukosta 4.1 nähdään, että käämien 1 ja 2 dimensiot ovat käytännössä yhtä suuret, minkä seurauksena monet käämin ominaisuudet ovat myös lähes samat. Käämien induktanssit, virrantiheydet sekä niiden muodostamien magneettikenttien voimakkuudet ovat käämeille lähes yhtä suuret. Tämän vuoksi käämeissä 1 ja 2 voidaan käyttää samoja virtojen arvoja samojen mittaolosuhteiden saavuttamiseksi.

Käämin 3 dimensiot poikkeavat kahdesta muusta käämistä, jolloin myös sen ominaisuudet ovat erilaiset. Kierrosten lukumäärän ollessa yhtä suuri, mutta muotokertoimen apumuuttujien α ja β kasvaessa käämin induktanssi kasvaa [3, s. 108]. Toisaalta käämissä 3 käytetyn johtimen suurempi poikkipinta-ala pienentää käämin virrantiheyttä, jolloin käämin tuottama magneettikenttä on heikompi käämeihin 1 ja 2 verrattuna. Johdinoptio 3 kriittinen virta on merkittävästi optioita 1 ja 2 suurempi. Poikkeavien ominaisuuksien vuoksi käämille 3 on määritettävä erikseen käämien 1 ja 2 tilanteita vastaavat virtojen arvot.

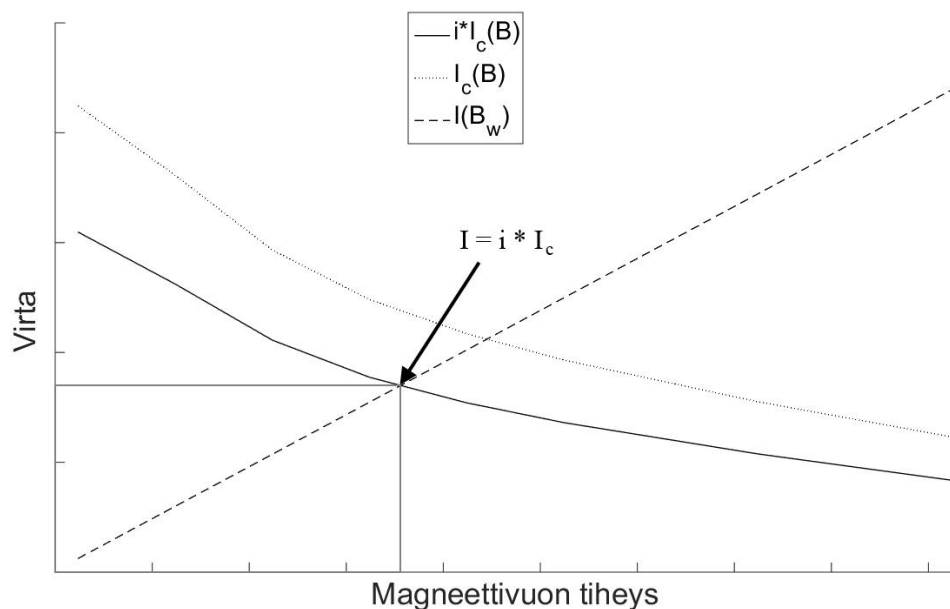
Käämien virtoja valittiin eri kriteerien perusteella. Ensisijaisesti virroille valittiin arvoja johdinten *short sample*-mittausten ja käämissä esiintyvän suurimman magneettivuontiheyden B_w perusteella siten, että käämin virran suhde kriittiseen virtaan oli halutun suuruinen. Lisäksi muita virtoja valittiin siten, että joko käämin magneettivuontiheys B_w , energia E tai virta I pidettiin vakiona.

4.3.1 Virtamarginaalit

Kaavalla 4.4 ja suhteella B_w/B_0 voidaan määrittää suurin käämin johtimen kokema magneettivuon tiheys. Johtimen *short sample*-mittausten ja magneettivuontiheyden B_w perusteella voidaan laskea käämille kriittisen virran arvo. Lisäksi voidaan määrittää käämin virran arvo, jolla kaavassa 4.6 esitetty käyttövirran ja kriittisen virran välinen suhde on halutun suuruinen.

$$i = \frac{I}{I_c(B_w)} \quad (4.6)$$

Halutun virtamarginaalin määrittämiseksi on esitettävä käämin kuormituskäyrä $I(B_w)$ yhdessä *short sample*-mittausten mukaisen $I_c(B)$ -käyrän kanssa. Kun johtimen $I_c(B)$ käyrä skaalataan kaavan 4.6 mukaisella virtojen suhteella ja sen kuvaaja piirretään samaan kuvaan käämin kuormituskäyrän kanssa, niiden leikkauspiste vastaa käyttövirran arvoa, jolla virtamarginaali on suhteen i suuruinen. Kyseinen tarkastelu on esitetty kuvassa 4.3.



Kuva 4.3: Virtamarginaalin määrittämiseen käytetty menetelmä. Kuvassa on esitetty skaalattu ja skaalaamaton kriittisen virran kuvaaja sekä käämin kuormituskäyrä.

Kyseisellä menetelmällä määritettiin käämien virtojen arvoja valitsemalla marginaaleja väliltä 0,45 – 0,95. Virtojen arvoja on esitetty taulukossa 4.2.

4.3.2 Vakioenergia

Magneettikenttään varastoitunut energia E saadaan virran I ja induktanssin L avulla kaavasta 4.7.

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (4.7)$$

Käämin magneettikenttään varastoitunut energia voidaan säätää halutun suuruisiksi valitsemalla sopiva virran arvo, kun käämien induktanssit tunnetaan joko mittausten tai laskujen perusteella. Toisen käämin virta voidaan ratkaista merkitsemällä kaavan 4.7 mukaiset energiat yhtä suuriksi ja ratkaisemalla virran I arvo, jolloin saadaan kaavan 4.8 yhtälö. Siinä termit L_0 ja I_0 ovat energialtaan tunnetun käämin induktanssin ja virran arvot.

$$I = \sqrt{\frac{L_0}{L}} I_0 \quad (4.8)$$

Vertauspisteenä voidaan käyttää esimerkiksi jotain toiselle käämille määritettyä virta-marginaalimittauksen tilannetta, ja määrittää virran arvo toisille käämeille sen perusteella. Vakioenergiaa vastaavien virtojen arvoja on esitetty taulukossa 4.2.

4.3.3 Vakio magneettivuon tiheys

Mittauspiste voidaan valita myös siten, että käämin suurin magneettivuontiheys B_w on sama eri käämien mittauksissa. Halutun magneettivuon tiheyden B_w synnyttämiseksi vaadittava virta saadaan ratkaistua kaavoista 4.4 ja 4.5. Tällöin arvoksi saadaan kaavan 4.9 mukainen virta.

$$I(B_w) = \frac{B_w A}{\delta N a F} \quad (4.9)$$

Kyseinen funktio on siis käämin kuormituskäyrän yhtälö, ja sitä käytetään myös virta-marginaalien määrittämiseen.

4.4 Approksimaatio yhtälöillä

Mallinnetaan työssä käytettävien magneettien ominaisuuksia kappaleessa 3 esitetyillä kaavoilla ja kappaleessa 4.3 määritetyillä virroilla. Kyseisten virtojen arvot on esitetty taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2: Mallinnuksessa ja mittauksessa käytettäviä eri perustein valittuja käämien virtoja.

	Käämi 1 & 2	Käämi 3
<i>Virtamarginaali</i>	Virta (A)	
0,45	146,2	197,0
0,55	166,1	223,8
0,65	186,0	252,2
0,75	204,6	276,9
0,85	222,1	298,6
0,90	230,2	308,4
0,95	238,7	318,2
<i>Vakio E (J)</i>	Virta (A)	
404	204,6	197,0
514	230,2	223,8
<i>Vakio B_w (T)</i>	Virta (A)	
2,16	204,6	223,8
2,44	230,2	252,2

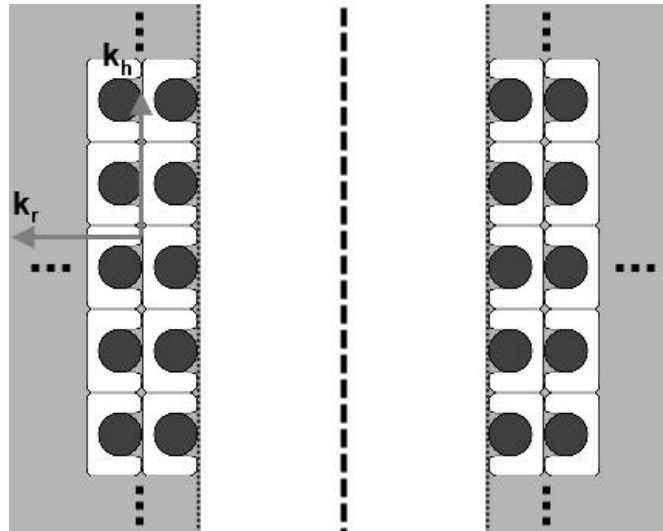
Taulukossa 4.3 on esitetty yleisesti mallinnuksessa käytettävien suureiden arvoja. Virran jakautumislämpötilan määrittämisessä kaavassa 3.3 on käytetty kriittisen lämpötilan arvoa 9,2 K ja ylemmän kriittisen magneettivuon tiheytenä 14,5 T. Johdinten *short sample*-mittausten perusteella johdinoptioiden 1 ja 2 kriittisenä virtana käytettiin arvoa 522 A ja optiolla 3 arvoa 943 A lämpötilassa 4,2 K ja ilman ulkoista kenttää. Tällöin siis optioiden 1 ja 2 virran jakautumislämpötilat olivat yhtä suuret, ja optio 3 puolestaan sai niistä poikkeavan suuremman arvon.

Taulukko 4.3: Mallinnuksessa käytetyt yleiset suureet ja niiden arvot laskennassa käytetyssä keskimääräisessä lämpötilassa. Ominaislämpökapasiteetit ja lämmönjohtavuudet on saatu CryoComp tietokannasta [8].

<i>Suure</i>	<i>Merkki</i>	<i>Arvo</i>	
Käyttölämpötila	T_0	4,2	K
Keskimääräinen lämpötila	T'	6,1	K
Virran jakautumislämpötila (Optiot 1 ja 2)	T_{cs1}	6,5	K
Virran jakautumislämpötila (Optio 3)	T_{cs3}	7,2	K
Transition lämpötila (Optiot 1 ja 2)	T_{t1}	7,8	K
Transition lämpötila (Optio 3)	T_{t3}	8,2	K
Kriittinen lämpötila	T_c	9,2	K
Referenssilämpötila	T_r	100	K
Matriisin ominaislämpökapasiteetti	$C_m(T')$	1953	J/(m ³ K)
Epoksin ominaislämpökapasiteetti	$C_e(T')$	6578	J/(m ³ K)
NbTi:n ominaislämpökapasiteetti	$C_{NbTi}(T')$	8319	J/(m ³ K)
PET-eristeen ominaislämpökapasiteetti	$C_i(T')$	4516	J/(m ³ K)
Matriisin lämmönjohtavuus	$k_m(T')$	751	W/(m K)
Epoksin lämmönjohtavuus	$k_e(T')$	0,064	W/(m K)
PET-eristeen lämmönjohtavuus	$k_i(T')$	0,020	W/(m K)
Matriisimetallin resistiivisyys	$\rho(T')$	$1,95 \cdot 10^{-10}$	Ωm

Kappaleiden 4.4.1 – 4.4.3 laskuissa materiaalien ominaislämpökapasiteettien ja resistiivisyyksien muutos lämpötilan funktiona on huomioitu suojausfunktion U referenssiarvoa $U(T_r)$ laskettaessa. Muutoin niiden sekä lämmönjohtavuuden arvoina on käytetty vakioarvoja keskimääräisessä lämpötilassa T' .

Kuvassa 4.4 on havainnollistettu magneetin rakennetta ja johtimen asettelua käämissä.



Kuva 4.4: Johdinten asettelua hahmottava kuva. Todellisessa käämissä johdinkerroksia on 26 ja kierroksia keskimäärin 28. Keskellä kulkeva katkoviiva kuvaa solenoidikäänin pituusakselia.

Kuvassa 4.4 on myös esitetty lämmönjohtavuuden komponentit eri dimensioissa. Johtimen pituussuuntainen lämmönjohtavuus k_z kulkee kuvassa tasoon ja siitä pois päin. Solenoidin säteen suuntainen lämmönjohtavuus on k_r ja sen akselin suuntainen k_h . Niiden avulla kaavalla 3.6 voidaan määrittää normaalialueen etenemisnopeuksien suhteelliset arvot α_r ja α_h , joita tarvitaan quench-analyysissä.

4.4.1 Käämin 1 analyysi

Quench-parametrien laskemiseen tarvittavat arvot saadaan määritettyä johtimen ja käämin rakenteen, käyttöolosuhteiden sekä materiaalikohtaisten suureiden perusteella. Mallinnus suoritetaan käämin virralla 222,1 A, koska se vastaa käämien mittauksissa vakiovirran mittauspistettä

Taulukko 4.4: Johdinoptiosta 1 valmistetun magneetin tapauskohtaiset suureiden arvot.

Suure	Merkki	Arvo
Käämin virrantiheys	J	95,8 A/mm ²
Kuparin osuus	λ_{Cu}	0,91
Niobititaanin osuus	λ_{NbTi}	0,04
Epoksin osuus	λ_{ep}	0,06
Suojausfunktion referenssiarvo	$U_r(T_r)$	$3,28 \cdot 10^{16}$ s A ² /m ⁴

Normaalialueen etenemisnopeus johtimen pituussuunnassa saadaan kaavasta 3.5a taulukoiden 4.3 ja 4.4 arvoilla. Tuloksena etenemisnopeudeksi saadaan noin 8,4 m/s. Johtimen ollessa eristämätön kuparikanava on suorassa sähköisessä ja termisessä kontaktissa viereisten kanavien kanssa, pois lukien väliin jäävä epoksikerros. Normaalialueen etenemistä quenchin aikana voidaan hahmottaa arvioimalla epoksikerroksen paksuutta ja johtimen lämmönjohtavuutta yksiuotteisesti kohtisuoriin suuntiin. Käämin lämmönjohtavuuden approksimaatioilla voidaan määrittää leviävän normaalialueen käämin säteen suuntainen α_r ja sen akselin suuntainen α_h arvo. Kaavasta 3.6 NZP:n α_r arvoksi saadaan 0,135 ja α_h arvoksi 0,129.

Kaavalla 2.4 MPZ:n säteeksi saadaan johtimen suunnassa 68,9 mm, käämin säteen suunnassa 13,1 mm ja akselin suunnassa 12,5 mm. MQE:n arvo saadaan kaavasta 2.6 MPZ ellipsoidin tilavuudesta ja ominaislämpökapasiteetin integraalista laskemalla. Pienin quenchin aiheuttava häiriöenergia on tämän perusteella noin 305,1 mJ.

Rajoittamattoman quenchin aika kaavasta 3.9 on noin 403 ms. Normaalialueen etenemisnopeudesta voidaan kuitenkin laskea, että normaalialue tulee kohtaamaan rajoituksia quenchin aikana. Lasketaan rajoitusten ajanhetket olettamalla quenchin alkavan käämin sisäpinnalta ja sen korkeuden puolesta välistä. Normaalialue leviää johtimen pituussuunnassa puoli kierrosta molempiin suuntiin ja kohtaa itsensä noin 7 ms kuluttua quenchin alun jälkeen. Käämin akselin suunnassa kasvava normaalialue kohtaa sen ylä- ja alareunan noin 27 ms kuluttua. Käämin sisäpinnalta alkava quench ei kasva oletuksen mukaisesti ellipsoidin muotoisena. Oletetaan kuitenkin säteen suuntaisen rajoituksen tapahtuvan normaalialueen levittyä käämin ulkopintaan ilman muita korjauksia. Tällöin kolmanneksi rajoittavaksi ajaksi tulee noin 28 ms. Näillä arvoilla kaavasta 3.15 rajoitteeksi quench ajaksi saadaan noin 3,36 s. Virran todellista käyrämuotoa voidaan hahmottaa quench ajan perusteella kaavalla 3.16 ja se on esitetty kuvassa 4.5.

Edellä määritettyä rajoitettua normaalialueen etenemistä käyttämällä suurimmaksi quenchin aikaiseksi jännitteeksi saadaan kaavalla 3.21 noin 1,2 V. Saman mallin hot spot- lämpötila kaavasta 3.23 on noin 88,7 K.

Taulukko 4.5: Eristämättömästä johtimesta valmistetun magneetin lasketut quench-parametrit.

Quench- parametri	Arvo
NZP	8,4 m/s
α_r	0,135
α_h	0,129
R_{mz}	68,9 mm
R_{mr}	13,1 mm
R_{mh}	12,5 mm
MQE	305,1 mJ
t_d	3,36 s
V_{max}	1,2 V
T_m	88,7 K

Käämin 1 stabiilisuus on erittäin hyvä suuren MQE:n perusteella. Samoin quenchin voidaan olettaa tapahtuvan turvallisesti, sillä pelkästään suuntaa-antavana arvionakin hot spot- lämpötila on merkittävästi yleisenä suprajohdekäämien lämpötilarajana käytetyn 200 K alapuolella [3, s. 470]. Käämin sisäinen jännitekään ei nouse merkittävästi tulosten perusteella.

Yksi mahdollinen tekijä, jota käytetty malli ei ota huomioon on muuttuvan magneettikentän kupariin indusoimat pyörrevirrat. Kuparikanavien ollessa suorassa kontaktissa viereisten kanavien kanssa ne muodostavat sähköisesti yhden johdinkierroksen käämin akselin ympäri. Samalla kuparikanavasta eristetty ydinlanka muodostaa lukumäärältään N_{tot} kierrosta käämin akselin ympäri, jolloin sähköisesti rakenne vastaa ilmasydämistä muuntajaa, jonka muuntosuhde on $N_{tot}/1$. Tällöin voidaan odottaa, että kupariin muodostuu mahdollisesti suuriakin pyörrevirtoja käämin magneettivuon tiheyden muuttuessa. Virtaa kasvatettaessa ilmiö on haitallinen, sillä se lämmittää käämiä ja rajoittaa virran kasvatusnopeutta. Toisaalta quenchin aikana kupariin indusoituvat pyörrevirrat ja niiden aiheuttamat resistiiviset häviöt kuluttavat osan magneettiin varastoituneesta energiasta, sekä mahdollisesti nopeuttavat normaalialueen etenemistä johtimen lämmitessä. Suojauksen kannalta kyseessä on siis luvussa 3.3.2 esitetty induktiivinen toi-

siokäämi, joka on termisessä kontaktissa käämin kanssa, ja se voi saada aikaan *quench-back*- ilmiön.

4.4.2 Käämin 2 analyysi

Päällystetyn magneetin tapauksessa johtimen dimensioissa ja siten virrantiheydessä ei ole suurta muutosta eristämättömään magneettiin nähden. Päällystyksellä voi kuitenkin olla vaikutusta käämityksen käyttäytymiseen virran muutosten aikana. Päällysteen kierrosten ja kerrosten välinen sähköinen eristys vaikuttaa muodostuvien pyörrevirtojen suuruuteen ja vaimenemiseen, ja siten niiden aiheuttamien häviöiden suuruuteen. Virran kasvattamisen kannalta päällyste parantaa tilannetta, jolloin virtaa voidaan kasvattaa nopeammin. Quenchin aikana heikommat pyörrevirrat luonnollisesti pienentävät niistä saatavaa etua. Myös päällystekerroksen aiheuttama muutos lämmönjohtavuuteen voi vaikuttaa normaalialueen etenemiseen ja siten yleisesti quench- parametreihin.

Käytetään taulukossa 4.6 esitettyjä arvoja quench- parametrien laskennassa. Käämin virtana käytetään myös 222,1 A, sillä se vastaa käämeille suoritettavaa vakiovirtamittauksen arvoa.

Taulukko 4.6: Johdinoptiosta 2 valmistetun käämin laskennan yhteydessä käytettyjen suureiden arvot.

Suure	Merkki	Arvo
Käämin virrantiheys	J	92,0 A/mm ²
Kuparin osuus	λ_{Cu}	0,88
Niobititaanin osuus	λ_{NbTi}	0,04
Epoksin osuus	λ_{ep}	0,05
Eristeen osuus	λ_{er}	0,03
Suojausfunktion referenssiarvo	$U_r(T_r)$	$3,10 \cdot 10^{16}$ s A ² /m ⁴

Kaavalla 3.5a laskettu arvo normaalialueen johtimen pituussuuntaiselle etenemiselle on noin 8,3 m/s. Ohuellakin päällystekerroksella on merkitystä johtimeen nähden kohtisuoralle lämmönjohtumiselle. Kuparikanavan päällystekerros vaikuttaa normaalialueen kohtisuoraan etenemisnopeuteen. Kaavalla 3.6 käämin säteen suuntaiseksi arvoksi α_r saadaan noin 0,039 ja käämin akselin suuntainen arvo α_h on noin 0,049.

Johtimen pituussuuntainen MPZ-säde kaavalla 2.4 laskettuna on noin 68,2 mm, joka on hyvin lähellä käämin 1 tulosta. Käämin akselin suuntainen MPZ:n säde on noin 4,8 mm ja säteen suuntainen 3,8 mm. MPZ ellipsoidin tilavuuden ja ominaislämpökapasiteetin integraalin perusteella kaavalla 2.6 määritetty MQE saa päällystetyn johtimen tapauksessa arvon 34,0 mJ.

Rajoittamattoman quenchin tapauksessa virran vaimenemiseen kuluisi kaavan 3.9 mukaan noin 598 ms. Käämin geometriasta johtuen leviävä normaali-alue kuitenkin kohtaa rajoituksia ennen kuin virta vaimenee täysin. Normaali-alue kohtaa itsensä johtimen pituussuunnassa noin 8 ms kuluttua quenchin alusta. Se saavuttaa käämin ylä- ja alareunan noin 73 ms kuluttua ja käämin ulkoreunan noin 99 ms kuluttua. Tällöin kaavan 3.15 mukainen rajoitettu quench aika on noin 3,47 s. Kaavan 3.16 mukainen virran vaimenemisen käyrämuoto on esitetty kuvassa 4.5.

Kaavan 3.21 antama tulos suurimmalle magneetin sisäiselle jännitteelle on noin 1,1 V. Hot spot- lämpötilaksi saadaan kaavan 3.23 mukaan noin 90,1 K. Quench- parametrit on koottu taulukkoon 4.7.

Taulukko 4.7: Päällystetystä johtimesta valmistetun magneetin quench- parametrit.

Quench- parametri	Arvo
NZP	8,3 m/s
α_r	0,039
α_h	0,049
R_{mz}	68,2 mm
R_{mr}	3,8 mm
R_{mh}	4,8 mm
MQE	34,0 mJ
t_d	3,47 s
V_{max}	1,1 V
T_m	90,1 K

Jännitteen ja hot spot- lämpötilan arvoilla ei ole merkittävää eroa käämiin 1 verrattuna, mutta MQE on huomattavasti pienempi. Kyseinen magneetti on siis tämän perusteella

alttiimpi häiriöiden aiheuttamille quencheille kuin eristämättömästä johtimesta valmistettu. Päälysteen vaikutus virran kasvattamisen aikaisiin pyörrevirtoihin ja häviöihin tulee kuitenkin selvittää ja verrata siitä aiheutuvia mahdollisia seurauksia.

4.4.3 Käämin 3 analyysi

Käämissä 3 käytetyn johdinoption 3 rakenteesta johtuen sen ominaisuudet poikkeavat kahdesta muusta käämistä. Johtimen poikkipinta-ala on suurempi, mikä puolestaan kasvattaa käämin dimensioita johdinkierrosten lukumäärän ollessa yhtä suuri kaikissa käämeissä. Käämin muodon vuoksi sen induktanssi on hieman käämejä 1 ja 2 suurempi, jolloin samalla käyttövirralla siihen varastoitunut energia on suurempi. Samoin johdinoption 3 kriittinen virta on suurempi, jolloin marginaali käyttövirran ja kriittisen virran välillä olisi suurempi. Toisaalta johdinoptiosta 3 valmistetussa magneetissa virrantiheys on pienempi johtimen suuremman poikkipinta-alan vuoksi. Tällöin johtimen kokonaiskierrosmäärän ja käyttövirran ollessa yhtä suuri kaikissa kolmessa magneetissa, eristetty magneetti tuottaa pienimmän magneettivuon tiheyden B_0 arvon.

Optiossa 3 eristeen sähkön- ja lämmönjohtavuus vaikuttavat merkittävästi magneetin ominaisuuksiin. Eristys hidastaa quenchin aikaisen normaali alueen etenemistä kerroksesta toiseen ja siten hidastaa virran vaimenemista. Samalla johdinkierrosten sähköisen eristyksen ansiosta kuparikanava ei muodosta ydinlangalle toisiokäämiä edellisten käämien tapaan. Eristyksen ansiosta toisiokäämi ei siis rajoita virran kasvatusnopeutta, mutta toisaalta se ei myöskään tuo mahdollisia quenchin aikaisia etuja. Taulukossa 4.8 on esitetty laskennassa käytettyjen suureiden arvot eristetyn johtimen tapauksessa, kun käämin virtana käytetään arvoa 223,8 A.

Taulukko 4.8: Eristetystä johtimesta valmistetun käämin laskennassa käytettyjen suureiden arvot.

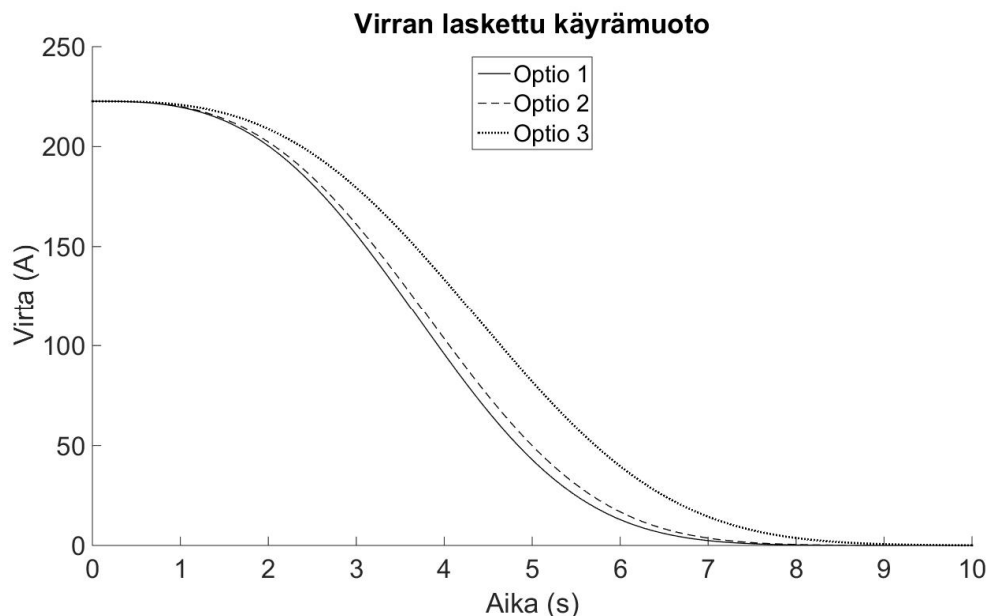
Suure	Merkki	Arvo
Käämin virrantiheys	J	69,4 A/mm ²
Kuparin osuus	λ_{Cu}	0,67
Niobititaanin osuus	λ_{NbTi}	0,03
Epoksin osuus	λ_{ep}	0,04
Eristeen osuus	λ_{er}	0,27
Suojausfunktion referenssiarvo	$U_r(T_r)$	$2,05 \cdot 10^{16}$ s A ² /m ⁴

Kaavalla 3.5a NZP:n arvoksi johtimen pituussuunnassa saadaan noin 6,6 m/s. Kyseisen johtimen tapauksessa johtimen eristyksellä on merkittävä vaikutus normaalialueen koh-tisuoraan etenemisnopeuteen. Solenoidin säteen suunnassa α_r on noin 0,006 ja sen kor-keussuunnassa α_h on noin 0,008.

Edellä käytettyjen lämmönjohtavuuksien arvoilla MPZ-säteiden arvoiksi saadaan johti-men pituussuunnassa noin 60,0 mm, solenoidin säteen suunnassa noin 0,9 mm ja akselin suunnassa 1,1 mm. Kun edellä laskettuja arvoja käytetään ellipsoidin puoliakseleiden suuntaisina säteinä, MQE:n arvo voidaan laskea kaavalla 2.6 ja sen arvoksi saadaan noin 2,90 mJ.

Rajoittamattomaksi quench ajaksi saadaan noin 1,4 s. Edellä määritettyjen NZP:n arvo-jen perusteella voidaan olettaa, että leviävä normaalialue tulee kohtaamaan rajoituksia quenchin aikana. Johtimen pituussuunnassa etenevä normaalialue kohtaa itsensä puolen kierroksen jälkeen noin 10 ms quenchin alun jälkeen. Solenoidin akselin suunnassa normaalialue kohtaa sen ylä- ja alareunan noin 627 ms kuluttua. Solenoidin säteen suunnassa kasvavalla normaalialueella kestää noin 901 ms saavuttaa sen ulkoreuna. Näitä arvoja käyttämällä rajoitetuksi quench ajaksi saadaan kaavan 3.15 mukaan noin 3,97 s.

Kuvassa 4.5 on esitetty kaavalla 3.16 määritetty virran käyrämuoto eri johdintyypeistä valmistetuille käämeille.



Kuva 4.5: Laskettu quenchin aikainen virran käyrämuoto vaimenemisajoilla 3,36 s käämille 1, 3,47 s käämille 2 ja 3,97 s käämille 3 johdintyyppille.

Quenchin aikaiseksi maksimijännitteeksi saadaan kaavalla 3.21 vain noin 1,1 V. Kaavan 3.23 mukainen hot spot- lämpötila quenchin seurauksena on noin 87,3 K.

Taulukkoon 4.9 on koottu laskennalliset quench- parametrit eristetystä johtimesta valmistetulle magneetille.

Taulukko 4.9: Johdinoptiosta 3 valmistetun käämin lasketut quench- parametrit.

Quench- parametri	Arvo
NZP	6,6 m/s
α_r	0,006
α_h	0,008
R_{mz}	60,0 mm
R_{mr}	0,9 mm
R_{mh}	1,1 mm
MQE	2,9 mJ
t_d	3,97 s
V_{max}	1,1 V
T_m	87,3 K

Johtimen eristys vaikuttaa merkittävästi lämmön johtumiseen johtimeen nähden koh-tisuorassa, minkä vuoksi MPZ on tilavuudeltaan erittäin paljon pienempi. Tämän vuoksi myös MQE on merkittävästi eristämättömän johtimen tapaukselta pienempi. Sen arvot ovat silti millijoulen kokoluokassa, mikä on stabiilisuuden näkökannalta hyvä tulos erityises-ti LTS sovelluksen tapauksessa.

4.5 Simulointi MIIT mallilla

Magneetin quenchin simuloinnissa ja hot spot lämpötilan T_m laskemisessa hyödynnetään MIIT (Mega I*I Time integral [7, s. 2055]) konseptia. Mallin oletuksena on, että kaikki matriisimetallissa quenchin aikana syntynyt lämpö sitoutuu johtimen ja eristeen ominaislämpökapasiteettiin, eikä lämmönjohtavuutta huomioida [6, s. 1]. MIIT-malli ei siis suoraan huomioi magneetin geometriaa. Materiaalien resistiivisyyksien arvot kuitenkin riippuvat magneettikentän arvosta, jolloin magneetin käyttöolosuhteet ja sijainti magneettikentässä vaikuttavat mallin antamiin tuloksiin [5, s. 10]. MIIT- mallia on käytetty esimerkiksi Euroopan hiukkasfysiikan tutkimuskeskuksen (CERN) suuren had-

ronitörmäytin (LHC) suprajohtinmagneettien suojauksen suunnitteluun ja mallintamiseen [14, 15].

Johtimen MIIT-arvo $\Gamma(T_m)$ voidaan määrittää kaavoilla 4.5a ja 4.5b, missä A on johtimen poikkipinta-ala, ja ominaislämpökapasiteetti C ja resistiivisyys ρ on suhteutettu niiden poikkipinta-alan osuuksien mukaisesti [6, s. 2]. Keskimääräisen resistiivisyyden arvossa on huomioitu kuparin ja niobititaanin resistiivisyys. Ominaislämpökapasiteetin laskemisessa on huomioitu lisäksi myös eristysmateriaali sekä epoksi-impregnointi.

$$\Gamma(T_m) = \int_0^\infty I^2(t) dt \quad (4.5a)$$

$$\Gamma(T_m) = A^2 \int_{T_0}^{T_m} \frac{C(T)}{\rho(T,B)} dT \quad (4.5b)$$

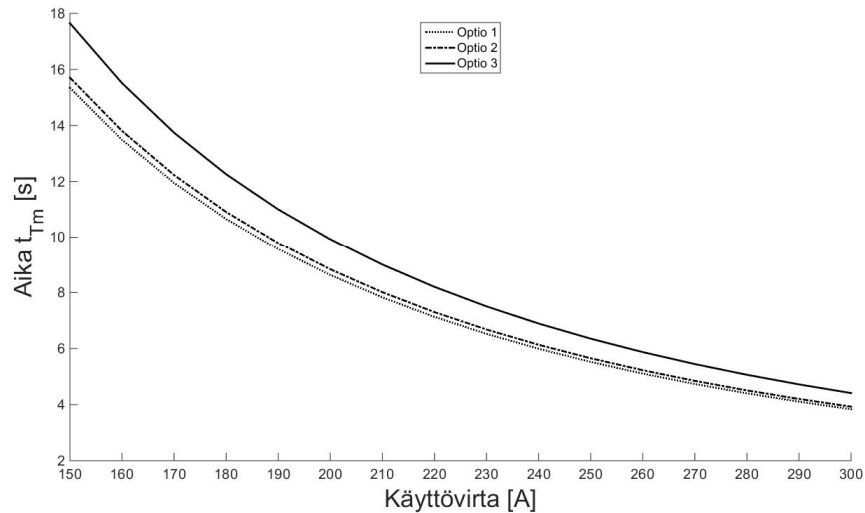
Mielivaltaisesti valitun hot spot- lämpötilan saavuttamiseen kuluva aika t_{Tm} voidaan arvioida yksinkertaistetusti olettamalla magneetin virran pysyvän quenchin aikana vakiona arvossa I_0 , jolloin kaavan 4.5a aikaintegraali väliltä $[0 \dots t_{Tm}]$ saa yksinkertaisen arvon $t_{Tm} * I_0^2$. Kun tämä merkitään yhtä suureksi kaavan 4.5b kanssa, valitun hot spot- lämpötilan saavuttamiseen kuluva aika saadaan kaavasta 4.6.

$$t_{Tm} = \frac{A^2}{I_0^2} \int_{T_0}^{T_m} \frac{C(T)}{\rho(T,B)} dT \quad (4.6)$$

MIIT mallilla voidaan arvioida magneetin hot spot- lämpötilaa quenchin jälkeen. Mikäli virran käyrämuoto on mitattu quenchin aikana, sen neliön integraali voidaan laskea kaavan 4.5a mukaisesti. Kun kaavat 4.5a ja 4.5b merkitään yhtä suuriksi, voidaan hakea hot spot- lämpötilan T_m arvo, joka toteuttaa yhtälön 4.7.

$$\int_{T_0}^{T_m} \frac{C(T)}{\rho(T,B)} dT = \frac{1}{A^2} \int_0^\infty I^2(t) dt \quad (4.7)$$

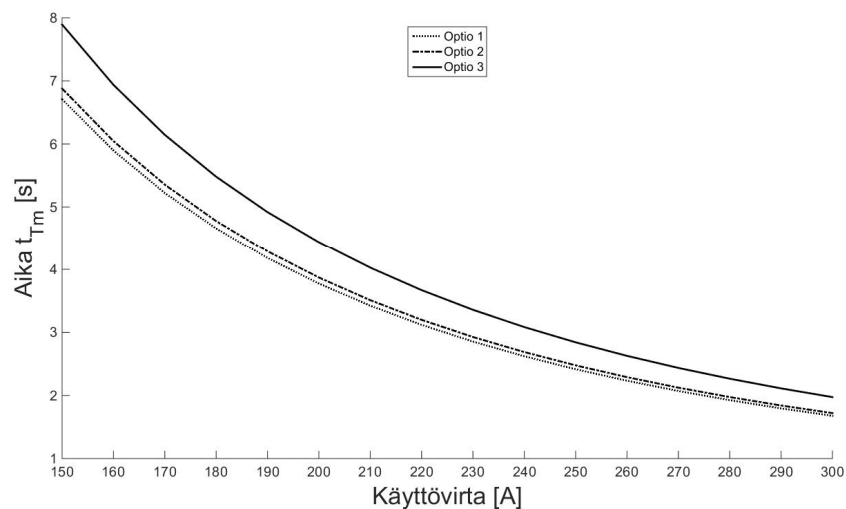
Kaavan 4.6 ominaislämpökapasiteettien ja resistiivisyyksien integraalin määrittämiseen käytettiin CryoComp [8] tietokannasta saatuja arvoja. Kuvassa 4.6 on esitetty simulaation tuloksia työssä käytetyille johdintyypeille. Hot spot- lämpötilaksi on valittu yleisesti LTS- ja HTS-magneeteille sallittu 200 K [3, s. 470].



Kuva 4.6: Hot spot- lämpötilan 200 K saavuttamiseen kuluva aika eri johdintyypeillä.

Optiolla 3 hot spot-lämpötilan saavuttamiseen kuluu huomattavasti optioita 1 ja 2 pidempi aika. Tämä johtuu johtimen suuremmasta poikkipinta-alasta ja eristeen tuomasta ylimääräisestä ominaislämpökapasiteetista [5, s. 10]. Vakiovirran mittausten virtoja vastaavilla arvoilla lämpötilan 200 K saavuttamiseen kuluu 6,9 s optiolla 1, 7,2 s optiolla 2 ja 8,1 s optiolla 3.

Jos lämpötila rajoitetaan vertailun vuoksi käämin 1 hot spot- lämpötilaan, eli taulukon 4.5 arvoon 88,7 K, aika t_{Tm} saa luonnollisesti pienempiä arvoja. Kuvassa 4.7 on esitetty kyseisen simulaation tulokset.

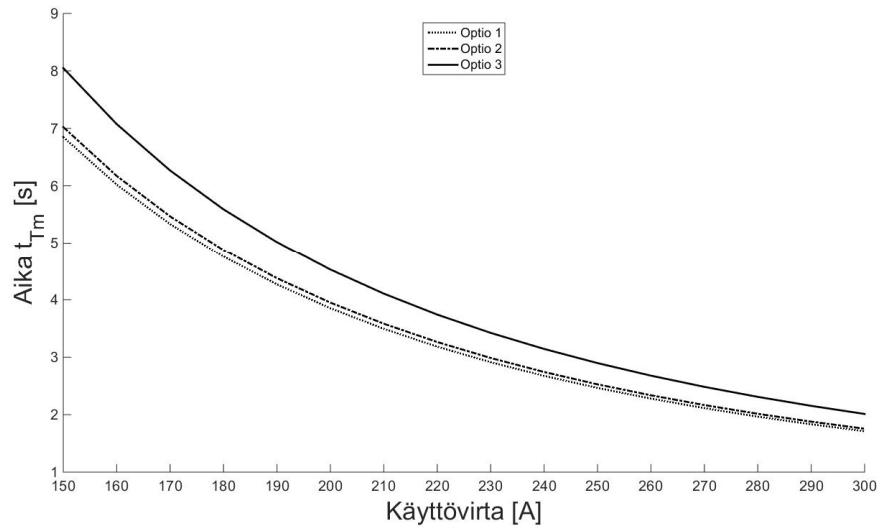


Kuva 4.7: Laskennallisesti määritetyn hot spot- lämpötilan 88,7 K saavuttamiseen kuluva aika eri johdintyypeillä.

Johdinoption 1 tapauksessa käämin käyttövirralla lämpötilan saavuttamiseen kuluvaksi ajaksi tule simulaation mukaan noin 3,02 s, mikä on melko lähellä kappaleen 3 kaavoil-

la määritettyä arvoa 3,36 s. Jälkimmäisen määrittämisessä on huomioitu käämin geometrian vaikutus normaalialueen etenemiseen ja siten quenchiin kuluvaan aikaan, toisin kuin MIIT mallissa, jossa ainoastaan johtimessa käytetyillä materiaaleilla ja niiden osuuksilla on vaikutusta.

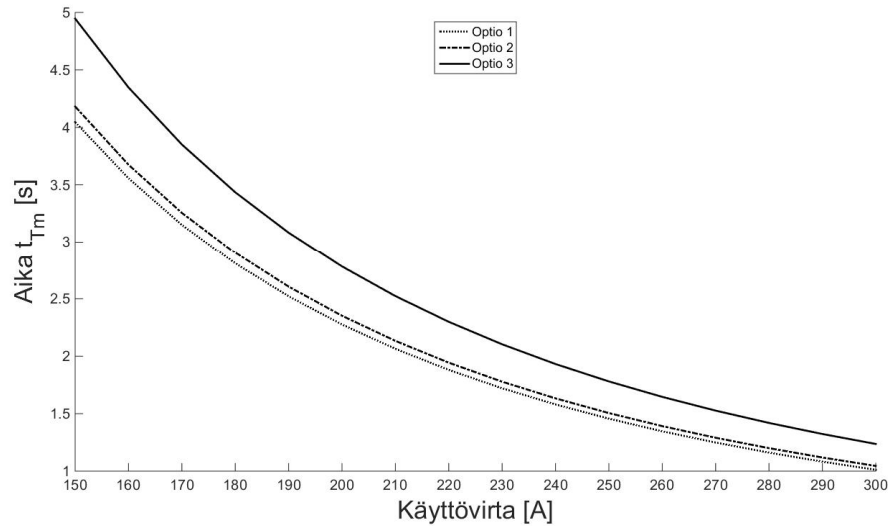
Valitsemalla simulaation kohdelämpötilaksi käämin 2 hot spot- lämpötila 90,1 K taulukosta 4.7 saadaan kuvassa 4.8 esitetty kuvaaja.



Kuva 4.8: Hot spot- lämpötilan 90,1 K saavuttamiseen kuluva aika eri käyttövirroilla ja johdintyypeillä.

Pienellä lämpötilaerolla ei ole suurta vaikutusta MIIT mallin tuloksiin ja kuvaajat ovat lähes samanlaiset edelliseen nähden. Päällystetyn johtimen hot spot- lämpötilan saavuttamiseen kuluva ajaksi käyttövirralla I_0 saadaan MIIT mallin mukaan 3,21 s, joka vastaa myös melko hyvin laskennallisesti määritettyä arvoa 3,47 s.

Vastaava simulaatio johdinoptiolle 3 on esitetty kuvassa 4.9, kun simulaation hot spot- lämpötilaksi valitaan taulukosta 4.9 käämin 3 mukainen lämpötila 87,3 K.



Kuva 4.9: MIT mallin antama lämpötilan 87,3 K saavuttamiseen kuluva aika eri johdintyypeillä.

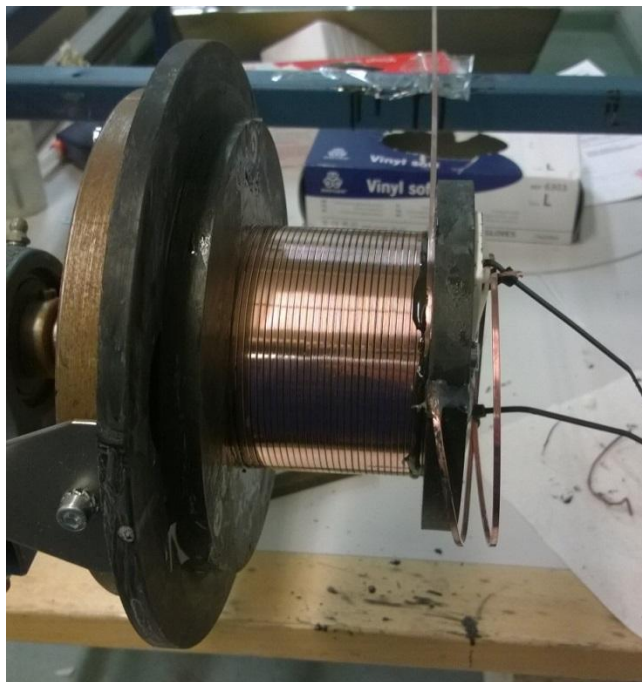
Eristetyn johtimen tapauksessa määritetyn hot spot- lämpötilan saavuttamiseen kuluu simulaation mukaan noin 3,53 s. Kolmen eri käämin tuloksista tämä arvo poikkeaa eniten vastaavasta lasketusta arvosta, joka tässä tapauksessa on 3,97 s.

5. KOEJÄRJESTELYT

Työhön liittyvät koejärjestelyt ja mittaukset suoritettiin Tampereen teknillisen yliopiston Sähkötekniikan laitoksella. Luvata Oy:n valmistamat WIC-suprajohtimet käämittiin magneeteiksi Sähkölaitoksen työpajassa ja mittaukset suoritettiin laitoksen kryolaboratoriossa.

5.1 Magneettien valmistus

Magneetit valmistettiin *wet layer*-menetelmällä, missä johdinkerrosten väliin lisättiin kerros Stycast 2850 FT-epoksia ja käämintä toteutettiin käsikäyttöisellä käämintäpöydällä. Johdin käämittiin muotin ympärille purkukelasta noin 70 – 80 N vetojännityksellä ja kierrokset ohjattiin vierekkäin käsiavusteisesti. Johdinkerrosten vaihdon yhteydessä käämin päädyissä käytettiin muovisia tukipaloja pitämään johdin oikeassa asennossa.



Kuva 5.1: Valokuva käämin 1 valmistuksen puolivälistä. Edellisen johdinkerroksen päälle ei ole lisätty vielä epoksikerrosta.

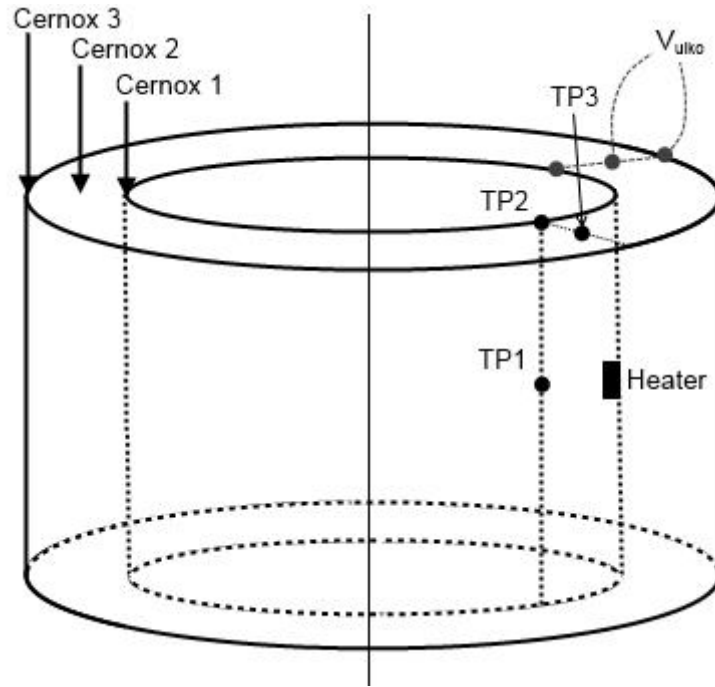


Kuva 5.2: Valokuva käämin 3 valmistuksen lopusta. Uloimmankin johdinkerroksen päälle lisättiin kerros epoksia.

Ensimmäinen valmistettu magneetti käämittiin johdinoptiosta 3. Siinä 26 johdinkerrokseen käämittiin yhteensä 720 kierrosta. Keskimäärin kerrokseen tuli siis 28 kierrosta ja joihinkin 27. Toinen magneetti käämittiin johdinoptiosta 1 ja viimeisenä valmistettiin johdinoptiosta 2 käämitty magneetti. Niissä kerrokseen tuli keskimäärin 28 ja muutama 29 kierrosta. Kahdessa viimeisessä käämissä viimeinen eli 26. kerros jätettiin vakaaksi, jotta käämin kokonaiskierrosmääräksi saatiin sama kuin eristetyn johtimen tapauksessa.

5.2 Käämien mittausanturit

Suprajohdemagneeteille suoritetuissa mittauksissa mitattiin käämissä esiintyviä lämpötiloja, jännitteitä ja käämin virtaa. Käämin virta mitattiin sekä virtalähteen ohjauksen perusteella, että erillisen virtamittarin avulla. Myös käämin sisäpinnalla sijaitsevalle resistiiviselle lämmittimelle syötettävän virtapulssin kesto ja virran suuruutta sekä ohjattiin tietokoneella että mitattiin lisäksi oskilloskoopilla. Mittausanturit kiinnitettiin paikoilleen käämin jälkeen, minkä vuoksi ne kaikki olivat kiinni käämin ulkopinnassa. Mittauslaitteiden sijainti on esitetty kuvassa 5.3.

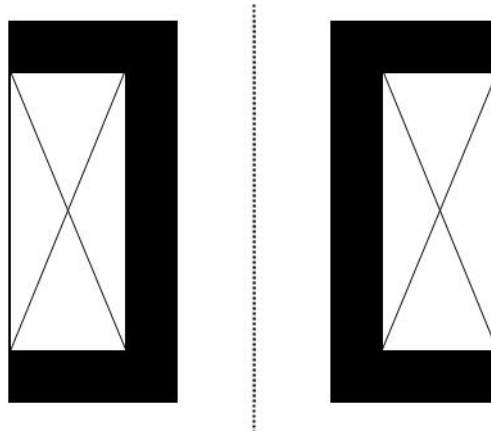


Kuva 5.3: Koejärjestelyissä käytettyjen mittaustantureiden sijainteja havainnollistava kuva.

Lämpötiloja mitattiin yhteensä kuudella anturilla, joista kolme olivat käämin yläpintaan sijoitettuja Cernox-antureita (Cernox 1 – 3) ja loput kolme käämin sisäsäteelle ja käämin yläpintaan kiinnitettyjä termopareja (TP 1 – 3). Kalibroitujen Cernox-antureiden lukemia voidaan yleisesti ottaen pitää hyvin tarkkoina eikä niiden tarkkuus riipu voimakkaasti niihin kohdistuvasta magneettikentästä [13]. Termoparien lukemat sen sijaan ovat epätarkempia ja alttiimpia magneettikentän aiheuttamalle virheelle. Siitä huolimatta termoparien lukemien avulla voidaan seurata käämin lämpötilojen muutoksia muihin antureihin verrattuna.

Käämin jännitteitä mitattiin sekä käämin napojen väliltä että käämin paksuuden puolenvälin ja ulkosäteen väliltä. Koska käämin puolikkaan jännitteen mittaamiseen käytettävät anturit kiinnitettiin valmiiseen käämiin, ne kytkettiin kuparikanavan kylkeen johtimen rakenteesta johtuen. Johdintooption 3 tapauksessa jännitelukema on selkeä, sillä ydinlangan ja kuparikanavan välillä ei ole sähköistä eristystä. Käämeissä 1 ja 2 sekä ydinlanka että kuparikanava kytkettiin kiinni virtalähteen syöttöön, mutta ydinlangan ja kuparikanavan välisestä eristyksestä johtuen virran tarkkaa jakautumista quenchin aikana ei tunneta. Tämän vuoksi jännitemittauksen tulosten tulkinta on vaikeampaa.

Mittaustantureiden kiinnittämisen jälkeen magneetti viimeisteltiin lisäämällä noin 1,5 cm kerros epoksia käämin sisäsäteelle sekä akselin suuntaisiin käämin pätyihin kuvan 5.4 esittämällä tavalla.



Kuva 5.4: Käämin poikkileikkaus viimeistelyssä lisätyn epoksikerroksen havainnollistamiseksi. Musta alue kuvaa lisättyä epoksia ja pystysuora katkoviiva solenoidin pituusakselia.

Epoksikerroksen tarkoituksena on eristää lämpötila-anturit ympäristön nesteheliumista ja parantaa käämin adiabaattisuutta. Käämin adiabaattisuus helpottaa mallinnusta ja tilanne vastaa paremmin kryojäähdyttimellä toteutettua jäähdytystä, missä jäähdytysteho on pieni.



Kuva 5.5: Valokuva valmiista kryostaattiin kiinnitetystä käämistä 3, johon on kiinnitetty mittaussanturit ja lisätty kerros epoksia.

Valmis käämi kiinnitettiin tukevasti kryostaattiin kiinnityslevyyn ja käämin navat juotettiin kiinni virran syöttöön pitkällä juotoksella. Käämin napojen ja mittaussanturien johtojen kiinnittämisen jälkeen kryostaatti suljettiin ja jäähdytys voitiin aloittaa.

5.3 Mittausohjelma

Käämeille tehdyillä mittauksilla selvitettiin niiden MQE- arvot eri tilanteissa. Kaikki mittaukset suoritettiin ainoastaan magneetin omakentässä ja olosuhteet valittiin muuttamalla käämien käyttövirta tiettyihin arvoihin. Ensimmäinen olosuhdekriteereistä oli käyttövirran ja käämille lasketun kriittisen virran välinen marginaali, jolle valittiin arvoja pienen ja suuren marginaalin alueelta. Toinen olosuhdekriteeri oli käämin johtimeen kohdistuvan suurimman magneettivuon tiheyden pitäminen yhtä suurena eri käämeissä. Muita kriteerejä olivat magneetteihin varastoituneen energian pitäminen vakiona sekä saman virran arvon käyttäminen kaikissa käämeissä. Virtojen arvot on laskettu luvussa 4.3 ja esitetty taulukossa 4.2.

Käämeille suoritettiin myös kriittisen virran mittaukset sekä kokeelliset virran nopean kasvattamisen mittaukset. Mittausten päätyttyä käämit 1 ja 2 jätettiin lämpötila- ja neli-johdinmittaukseen, jolla saatiin määritettyä käämin resistanssi lämpötilan funktiona.

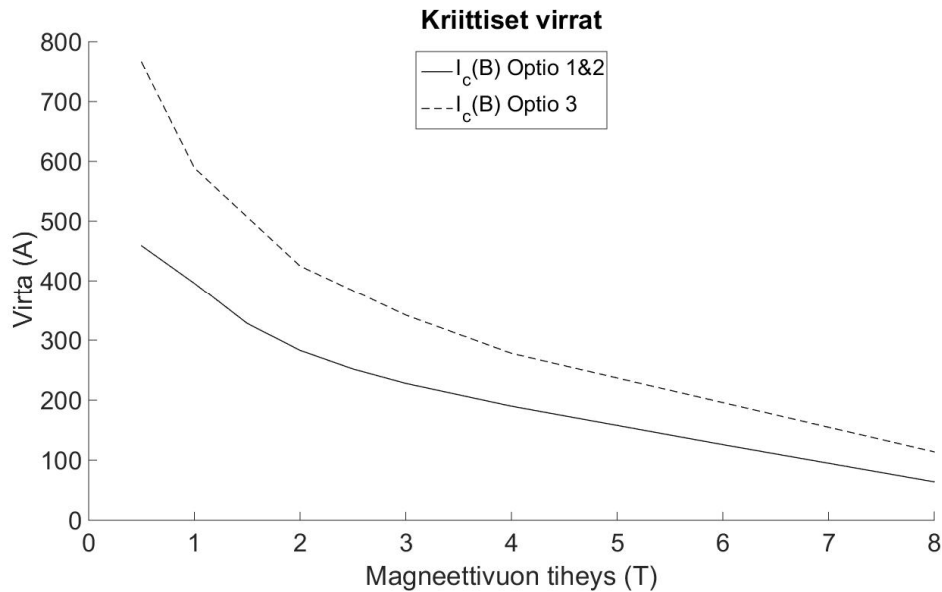
5.3.1 MQE- arvon määrittäminen

Käämien MQE- arvon määrittämiseen käytettiin käämin sisäpintaan kiinnitettyä vastusta, *heateria*. Sen läpi ajettiin virtapulsseja, jolloin siinä syntyvä lämpö kuvasi magneettisissa syntyvää häiriöenergiaa. *Heater* sijaitsi käämin suurimman kentän alueella käämin sisäosalla ja korkeuden puolivälissä, ja sen sijainti on havainnollistettu kuvassa 5.3. Syötetyn häiriöenergian suuruutta muutettiin säätämällä *heater*-pulssin kesto ja virran suuruutta. Käämien 1 ja 2 mittauksissa virtapulssin kesto päädyttiin pitämään vakiona ja pulssin energiaa säädettiin virran suuruutta muuttamalla.

MQE- arvoa lähdettiin määrittämään valitsemalla häiriöenergialle alkuarvo laskujen perusteella. Virtapulssille määritettiin kyseistä energiaa vastaava virran suuruus ja pulssin kesto *heaterin* resistanssin perusteella. Virtapulssin syöttämisen jälkeen tarkasteltiin seurasiko siitä quench. Mikäli seurauksena oli quench, käämin jäähtyttyä seuraavaan mittaukseen määritettiin virtapulssi, jonka energia oli edellistä pienempi. Mikäli pulssista ei seurannut quenchia, sen energiaa kasvatettiin. Tällä menetelmällä pyrittiin määrittämään pienin vastukselle syötettävä quenchin johtava energia noin 5 – 10 mJ tarkkuudella.

5.3.2 Virtamarginaalit

Käyttövirran ja käämin kriittisen virran välinen marginaali määritettiin Luvata Oy:ltä saatujen johdinten *short sample*- mittausten ja käämeille määritettyjen kuormituskäyrien avulla. Menetelmä on esitetty kappaleessa 4.3.1 ja käytetyt virran arvot on koottu taulukkoon 4.2. Kuvassa 5.6 on esitetty eri johdintyyppien *short sample*- mittausten mukaiset $I_c(B)$ - käyrät.



Kuva 5.6: Luvata Oy:n toimittamien short sample- mittaustulosten mukaiset kriittisten virtojen arvot magneettivuon tiheyden funktiona.

PET-eristetyn johdinoption 3 kriittinen virta on optioita 1 ja 2 suurempi. Toisaalta johtimen suuremman poikkipinta-alan vuoksi sen virrantiheys on pienempi. PET-eristemyös heikentää käämin sisäistä lämmönjohtavuutta ja siten sen stabiilisuutta.

5.3.3 Vakio magneettivuon tiheys, energia ja virta

Magneeteille valittiin virtojen arvoja, joilla johtimeen kohdistuva suurin magneettivuon tiheys oli yhtä suuri. Mittausten edetessä päädyttiin käyttämään magneettivuon tiheyden arvoina noin 2,16 T ja 2,44 T arvoja. Käämissä 3 kyseisiä magneettivuon tiheyksiä vastaavat virtasuhteiden 0,55 ja 0,65 virrat.

Magneetteihin varastoitunut energia saatiin laskettua käämien induktanssien perusteella. Käämin 3 mittausten jälkeen päädyttiin valitsemaan virtojen arvoja, joilla käämien energia on noin 404 J tai 514 J. Käämin 3 virtamarginaalien 0,45 ja 0,55 suuruiset virrat vastaavat kyseisiä energioita. Käämien 1 ja 2 virtamarginaalien 0,75 ja 0,90 virrat vastaavat sekä vakio magneettivuon tiheyden että vakioenergian tilanteita.

Pidettäessä magneettien virran suuruus samana käytettiin noin 223 A virtaa.

5.3.4 Kriittinen virta ja virran nopea kasvattaminen

Kriittisen virran arvo eri magneeteille määritettiin kasvattamalla syötettyä virtaa, kunnes käämi koki quenchin. Virran kasvattamisnopeus oli matala erityisesti lähestyttäessä laskettua kriittisen virran arvoa. Siten pyrittiin minimoimaan virran muutoksesta johtuvia pyörrevirtoja ja niiden aiheuttamaa lämmön tuottoa. Pyörrevirtojen aiheuttama lämpöti-

lan nousu puolestaan vaikuttaa kriittisen virran arvoon, jolloin niitä minimoimalla päästään mahdollisimman lähelle todellista kriittistä virtaa.

Mikäli kriittisen virran mittauksella saadaan toistojen myötä suurempia arvoja, käämissä esiintyy *training*- ilmiötä, ja mittauksia tulee toistaa kunnes kriittisen virran arvo ei enää kasva.

Tavallisten kriittisen virran mittausten lisäksi ne toistettiin käämeille 1 ja 2 suuremmilla virran kasvattamisnopeuksilla. Virran kasvattamisnopeus välillä 0 – 10 A rajattiin arvoon 1 A/s, jotta virran kytkennästä aiheutunut lämpötilapiikki ehti tasaantua. 10 A:n jälkeen virtaa kasvatettiin eri nopeuksilla kunnes käämi koki quenchin. Kasvattamisnopeus pidettiin vakiona väliltä 2 – 12 A/s valitussa arvossa kunkin toiston ajan.

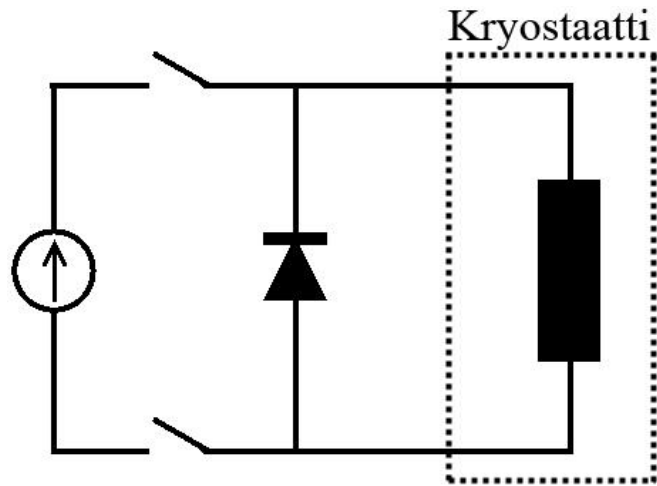
Mittauksilla pyrittiin selvittämään mahdollinen suhteellinen ero pyörrevirtojen muodotumisessa johdinoptioiden 1 ja 2 välillä, ja siten päättämään option 2 lakkapäällysteen vaikutusta niihin.

5.3.5 Käämin resistanssi lämpötilan funktiona

Käämeille 1 ja 2 suoritettiin niiden resistanssin arvon mittaus lämpötilan funktiona. Kun muut mittaukset oli saatu päätökseen, käämit jätettiin jatkuvaan lämpötila- ja nelijohdinmittaukseen. Nesteheliumin haihuttua käämin lämpötila alkoi nousta, jolloin pitkällä aikavälillä saatiin mitattua käämin resistanssi lämpötilan funktiona.

5.4 Mittauskytkentä

Mittauksissa käytetty kytkentä koostui suprajohdemagneetista, virtalähteestä, katkaisijasta ja diodista. Diodi kytkettiin magneetin kanssa rinnan siten, että normaalissa virran syötössä diodi oli estosuuntaan biasoitu. Katkaisija kytkettiin virtalähteen ja diodin väliin. Katkaisijan auetessa virtalähde irtoaa magneetista ja virta siirtyy kulkemaan diodin kautta. Kytkentä on havainnollistettu kuvassa 5.7.



Kuva 5.7: Koejärjestelyssä käytetty kytkentä

Katkaisija sekä käämin sisäpinnalle kiinnitetyt *heater*-vastukset olivat tietokoneohjattuja. Katkaisija avattiin automaattisesti 3 sekunnin viiveellä jokaisen pulssin jälkeen, koska magneetille ei ollut automaattista quenchin havaitsemisen menetelmää. Viiveen aikana ehdittiin nähdä seurasiko syötetystä virtapulssista quench. Vaikka seurauksena ei olisikaan ollut quench, kytkimen avauduttua käämin virta vaimeni nolnaan resistiivisen diodin ja virran muutoksen aiheuttamien pyörrevirtojen synnyttämän lämmön ansiosta.

6. MITTAUSTULOKSET

Suprajohdemagneettien mittaukset suoritettiin ensimmäisenä käämille 3 27. – 28.5.2015. Toisena suoritettiin käämin 1 mittaukset 2. – 3.6.2015. Käämin 2 mittaukset suoritettiin viimeisenä 9.6.2015.

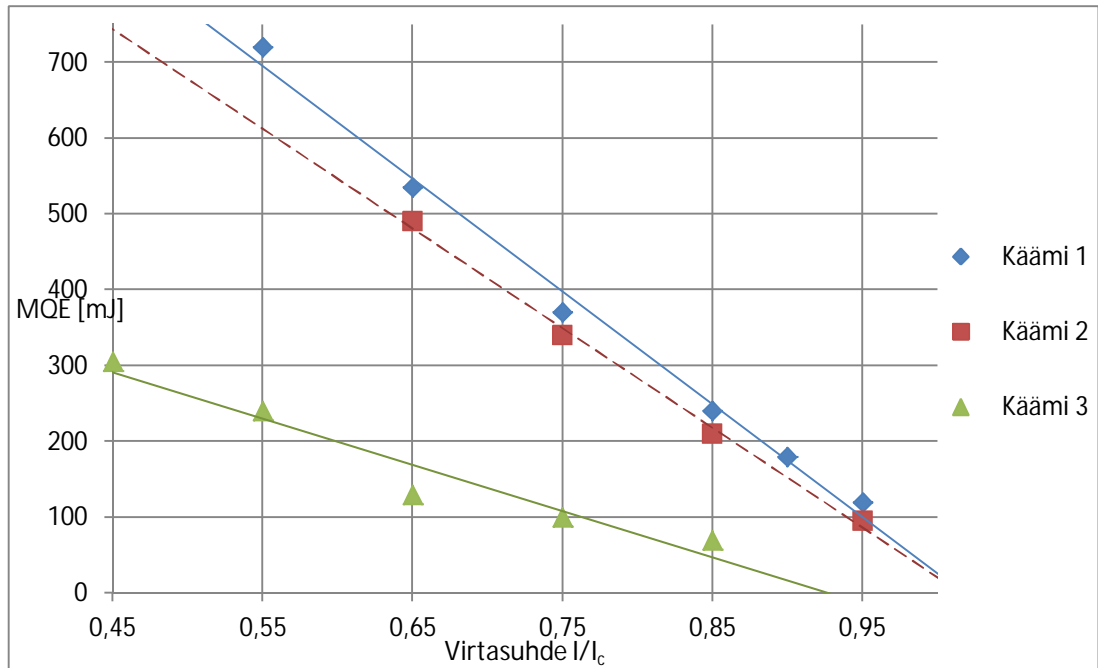
6.1 MQE- mittausten tulokset

Mittaamalla määritetyt MQE- arvot olivat erittäin paljon laskettuja arvoja suurempia. Osittaisena selityksenä voi olla aliarvioitu lämmönjohtavuus käämin sisällä, jolloin sen suurempi todellinen arvo kasvattaa MQE- arvoa. Toisaalta lämmön siirtyminen *heaterista* käämitykseen ei välttämättä ole täysin adiabaattista, jolloin todellinen käämiin siirtyvä lämmön määrä on pienempi kuin *heater-* pulssin kokonaisenergia.

Virhettä aiheutui mahdollisesti myös *heaterin* ja johtimen välisestä kontaktista. Käämin 3 tapauksessa sähköinen kontakti *heaterien* ja johtimen kuparikanavan välillä menetettiin, mikä tarkoittaa että ne irtosivat käämin pinnasta. Myös käämissä 2 *heaterit* irtosivat käämin sisäpinnasta jäähtytyksen aikana, mutta sähköinen kontakti palasi mittausten edetessä. Käämissä 3 kontakti ei palautunut, mikä saattoi osaltaan vaikuttaa suurempiin vaihteluihin mitatuissa MQE- arvoissa.

Käämin 3 mittauksissa *heater-* pulssin energiaa muutettiin pääasiassa pulssin pituutta muuttamalla. Pulssin pituutta kasvatettiin alentamalla virran arvoa, kun pulssin kestoai-ka laski välille 15 – 20 ms. Käämien 1 ja 2 mittauksissa virtapulssin kesto päädyttiin pitämään vakiona aluksi 50 millisekunnissa. Suurten MQE- arvojen vuoksi pulssin kesto kasvatettiin 150 millisekuntiin matalilla virtasuhteiden arvoilla käämeillä 1 ja 2, koska *heaterit* eivät kestäneen lyhyiden pulssien tuottamaa tehoa.

Eri mittausten mukaiset MQE- arvot on esitetty liitteen A taulukossa ja niiden arvot on esitetty kuvassa 6.1.



Kuva 6.1: Eri virtasuhteille määritetyt MQE- arvot

Kuvaajasta nähdään, että mitatut MQE- arvot sopivat yhteen teorian kanssa siten, käämi 1 saa suurimmat ja käämi 3 pienimmät arvot. Toisaalta käämien MQE- arvot ovat erittäin paljon suuremmat kuin laskennallisesti määritetyt.

Verrattaessa käämin 2 MQE- arvoja käämin 1 arvoihin voidaan arvioida lakkakerroksen vaikutusta stabiilisuuteen. Virtasuhteella 0,95 MQE- arvo on noin 21 % pienempi kuin käämin 1. Suhteellinen alenema pienenee virtasuhteen laskiessa, ja virtasuhteella 0,65 käämin 2 MQE- arvo on vain noin 8 % käämin 1 arvoa pienempi.

6.1.1 MQE- tulosten vertailu

Mitatut MQE- arvot olivat suuria korkeillakin virtasuhteilla. Erityisesti adiabaattisissa LTS-sovelluksissa käämien MQE- arvot voivat olla alle millijoulen kokoluokkaa. Esimerkiksi eräälle niobitinajohtimelle määritetty MQE- arvo 10 T magneettivuontiheydessä vaihteli alle 2 mJ ja yli 0,5 mJ välillä virtasuhteiden 0,80 ja 0,95 välillä [16, s. 3411]. Vastaavasti lukuisille niobititaanijohtimille suoritetuissa mittauksissa MQE oli 4,2 K lämpötilassa ja 6 T ulkoisessa kentässä noin 300 μ J ja 15 μ J välillä virtasuhteiden 0,50 – 1,00 välillä [18]. Työssä suoritettut mittaukset suoritettiin ainoastaan käämin omakentässä, jotka olivat suurimmillaan noin 2,6 T, 2,5 T ja 2,9 T käämeille 1, 2 ja 3. Siitä huolimatta esimerkiksi käämien 1 ja 2 noin 100 mJ MQE virtasuhteella 0,95 on erittäin suuri ja vastaa kokoluokaltaan lähinnä HTS- johdinten arvoja.

Eräälle Superpower Inc. yrityksen valmistamalle YBCO- johtimelle mitattu MQE- arvo 0,1 T ulkoisessa kentässä lämpötilavälillä 62 K – 42,5 K virtasuhteella 0,95 oli noin 200

mJ. Saman johtimen MQE omakentässä ja virtasuhteella 0,9 oli hieman alle 100 mJ lämpötilassa 58 K ja hieman yli 30 mJ lämpötilassa 79 K. [19.]

Vertailusta voidaan päätellä, että tässä työssä suoritetuissa kokeissa käytetyt magneetit olivat erittäin stabiileja, vaikka vain pieni osa *heaterin* tuottamasta häiriöenergiasta olisi siirtynyt johtimeen.

6.2 Kriittiset virrat

Kriittisen virran mittauksessa käämin virtaa kasvatettiin nopeudella 1 A/s noin virtamarginaaliin 0,95 saakka. Tämän jälkeen kasvatusnopeus laskettiin nopeuteen 0,5 A/s, jotta välttyttiin virran muutoksesta aiheutuvien pyörrevirtojen aiheuttamalta lämpenemiseltä mahdollisimman hyvin.

Kriittisen virran mittaukset suoritettiin kahdesti käämeille 1 ja 3. Käämille 2 suoritettiin vielä kolmas toisto mittausten päätteeksi. Saavutetuissa huippuvirtojen arvoissa ei tapahtunut muutoksia toistojen myötä, eli käämeissä ei esiintynyt *training-* ilmiötä.

Taulukko 6.1: Käämeille mitatut ja vastaavien johdinten kriittiset virrat.

	Mitattu I_c (A)	Short sample I_c (A)
Käämi 1	252,3	246,8
Käämi 2	248,1	246,8
Käämi 3	327,0	327,5

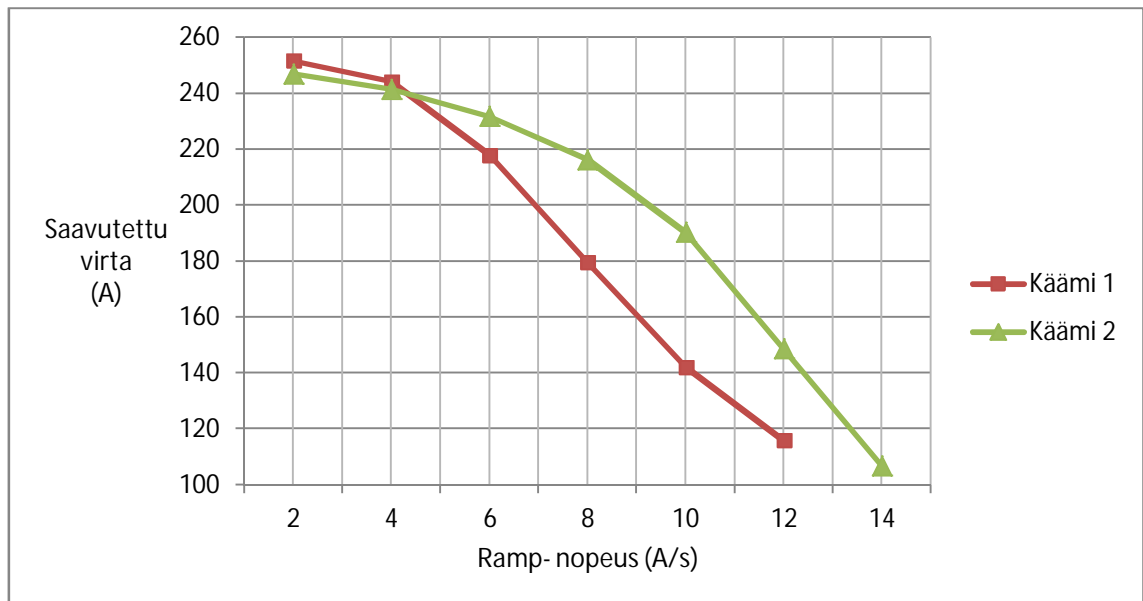
Luonnollisesti käämin kriittinen virta ei voi olla johtimen todellista kriittistä virtaa suurempi. Mikäli *short sample-* mittausten kriittisen virran arvon virhe ei ole suuri, käämin voidaan päätellä suoriutuneen hyvin eikä magneetin valmistuksesta seurannut käämin heikentymistä. Valmistetut käämit olivat kuitenkin hyvin pieniä koemagneetteja, ja esimerkiksi magneettikuvauslaitteissa käytetyissä suuremmissa magneeteissa käämintävirheet tai muut heikentymistä aiheuttavat tekijät ovat todennäköisempiä ja niissä voidaan jäädä huomattavasti kauemmas *short sample-* arvoista.

Koska käämeissä ei esiintynyt *training-* ilmiötä eikä heikentymistä, voidaan päätellä että johdin sopii käämittäväksi erittäin hyvin. Poikkileikkaukseltaan suorakaiteen muotoinen johdin asettuu paikalleen tukevasti ja tukee siten myös viereisiä kierroksia.

6.3 Virran *ramp*- nopeus testit

Kuparin suuren poikkipinta-alan osuuden vuoksi pyrittiin tarkastelemaan virran muutoksesta seuraavien pyörrevirtojen muodostumista. Käämissä 1 kuparikanavat olivat mahdollista epoksikerrosta lukuun ottamatta sähköisessä kontaktissa viereisten kierrosten kanssa, jolloin ne muodostivat yksikierroksisen toisiokäämin ydinlangan ympärille. Käämissä 2 kanava oli päällystetty ohuella eristekerroksella, mikä heikensi sähköistä kontaktia. Käämeissä 1 ja 2 muodostuvien pyörrevirtojen suhteellisia arvoja pyrittiin arvioimaan eri virran kasvatusnopeuksien avulla. Virran kasvatuksen aikana seurattiin käämien lämpötiloja sekä saavutettua suurinta virran arvoa.

Mittauksissa virta kasvatettiin välillä 0 – 10 A nopeudella 1 A/s, jotta virtalähteen kytkennästä aiheutuvan virta- ja jännitepiikin tuottama lämpö ehti tasaantua. Tämän jälkeen virtaa kasvatettiin valitulla vakionopeudella kunnes käämi koki quenchin. Kuvassa 6.2 on esitetty saavutetut huippuvirrat *ramp*- nopeuden funktiona.



Kuva 6.2: Saavutettujen kriittisten virtojen arvot eri *ramp*- nopeuksilla.

Käämien välillä näkyi selvä ero saavutetuissa huippuvirran arvoissa kun virran kasvatusnopeus oli yli 5 A/s. Vaikka käämin 2 kriittinen virta oli hieman pienempi, nopeammilla virran *ramp*- nopeuksilla sillä päästään käämiä 1 suurempiin huippuvirran arvoihin. Virran muutoksen aiheuttamien pyörrevirtojen suhteellisia suuruuksia arvioitiin myös sen aikaisen lämpötilan muutoksen avulla. Kyseiset tulokset on esitetty taulukossa 6.2.

Taulukko 6.2: Virran kasvattamisen aikaisen Cernox 1- anturin lämpötilan T_{ramp} ja nesteheliumin lämpötilan T_0 välinen lämpötilaero ΔT .

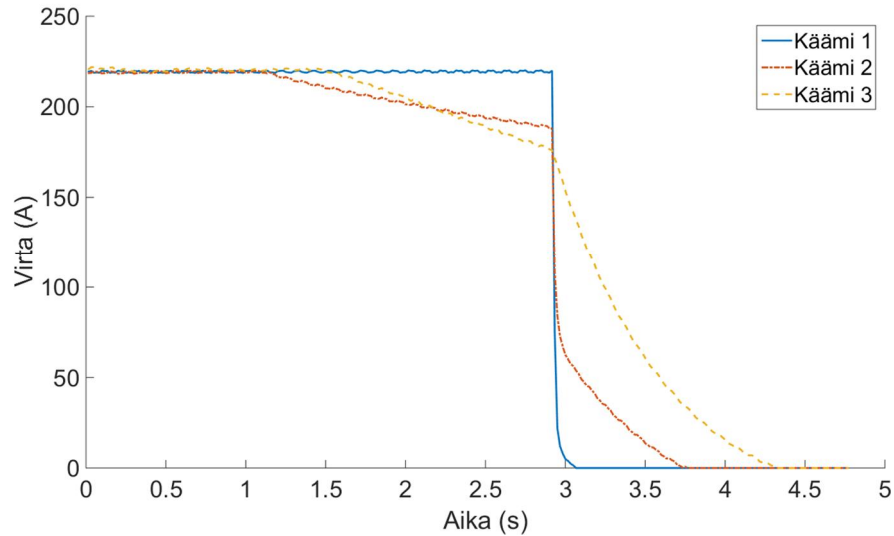
$\Delta T = T_{ramp} - T_0$ [K]							
	2 A/s	4 A/s	6 A/s	8 A/s	10 A/s	12 A/s	14 A/s
Käämi 1	0,15	0,62	1,28	2,02	2,50	-	-
Käämi 2	0,002	0,1	0,37	0,72	1,12	1,51	-

Nähdään, että lämpötilan nousu oli merkittävästi suurempi käämissä 1, mikä selittää käämiä 2 pienemmät huippuvirtojen arvot. Käämin 2 lämpötilan nousu ΔT virran muuttuessa on vain noin 1 % verrattuna käämiin 1 *ramp*- nopeudella 2 A/s. *Ramp*- nopeuden kasvaessa käämin 2 ΔT sai suhteellisesti suurempia arvoja, mutta nopeudella 10 A/s se oli yhä vain noin 45 % käämin 1 arvosta.

Lämpötila ei ehtinyt tasaantua vakioarvoon ennen quenchia virran *ramp*- nopeuden arvolla 12 A/s käämissä 1 ja nopeudella 14 A/s käämissä 2.

6.4 Virran vaimeneminen

Käytetty mittauskytkentä häytti virran vaimenemisen käyrämuodon määrittämistä. Quenchin alettua virtalähde syötti magneettia vielä noin 3 sekunnin ajan, mikä luonnollisesti vaikutti virran käyrämuotoon. Kuvassa 6.3 on esitetty käämien virtojen käyrämuodot tilanteessa, jossa virran arvo quenchin alkuhetkellä oli noin 222,7 A kaikissa käämeissä.

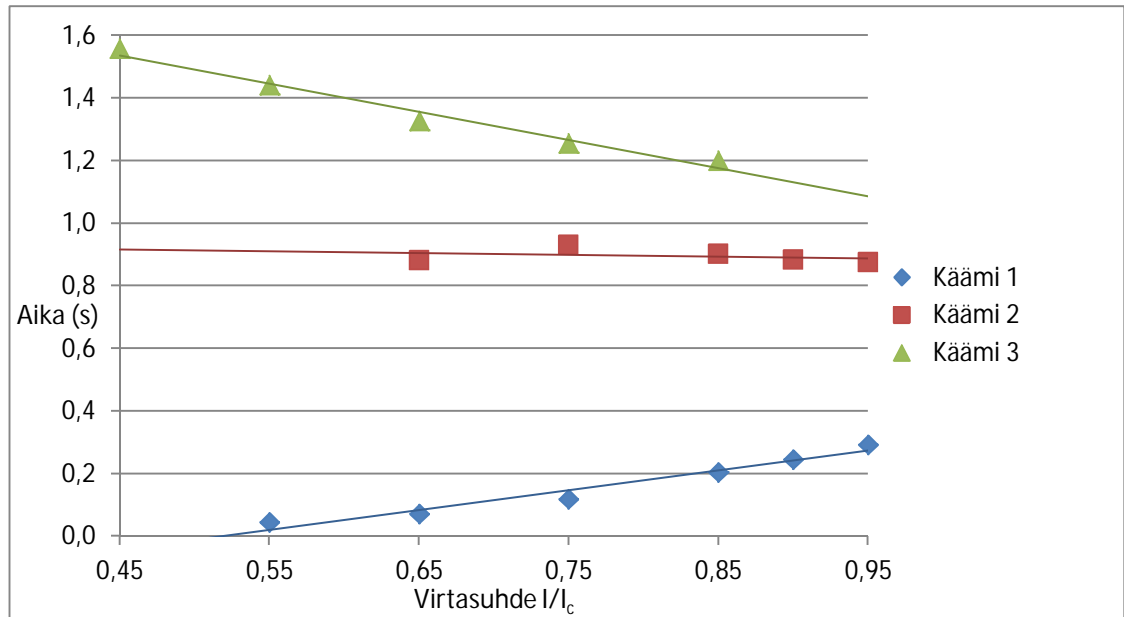


Kuva 6.3: Virran vaimenemisen käyrämuodot quenchin alkuhetken virran ollessa suunnilleen yhtä suuri. Heater-pulssi syötetään ajan hetkellä 0, jolloin katkaisija aukeaa virran jyrkän askeleen kohdalla.

Käämien 2 ja 3 virrat lähtevät lineaariseen laskuun pienellä viiveellä quenchin alkamisen jälkeen. Virtalähde kykenee pitämään käämin 1 virran sen alkuarvossa katkaisijan aukeamiseen saakka. Siitä huolimatta katkaisijan avauduttua käämin 1 virta vaimenee nopeimmin. Käämin 2 virta on myös hieman käämin 3 virtaa suurempi, mutta vaimenee silti merkittävästi sitä nopeammin.

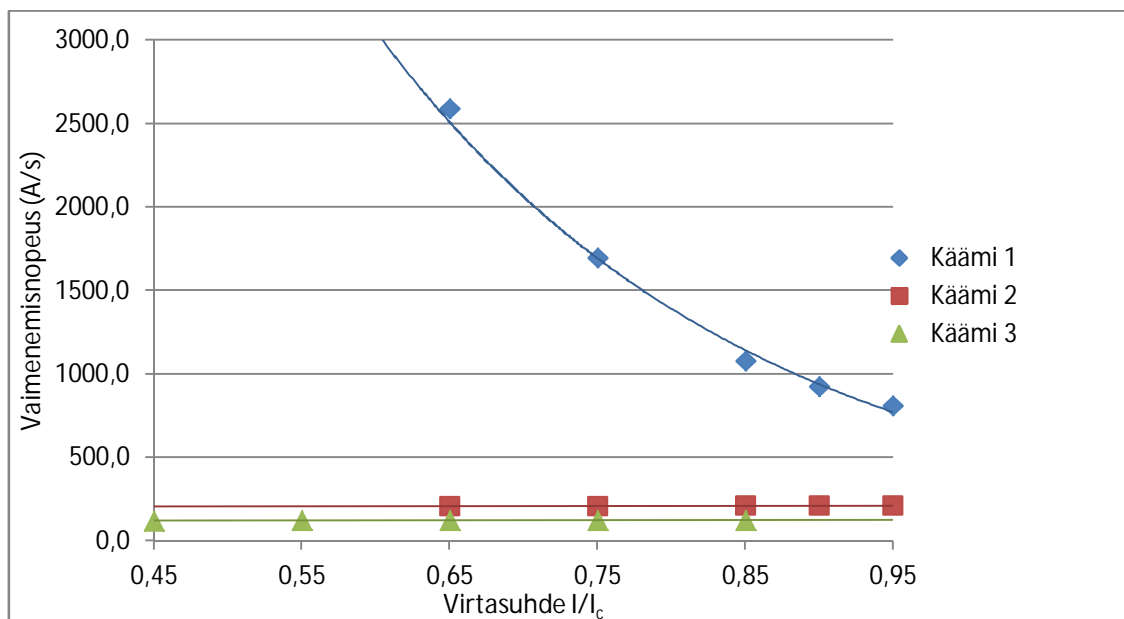
Tarkastelemalla kaikkia mittausten aikana tapahtuneita quencheja pyritään selvittämään virran vaimenemiseen kuluva aika. Virran vaimenemista on mielekästä tarkastella katkaisijan auettua, jolloin virtalähde ei enää vaikuta käämien virtaan. Normaali alue ehtii levitä katkaisijan toiminnan viiveen aikana, minkä vuoksi normaali alueen etenemistä ei voida päätellä virran käyrämuodon perusteella. Mittauksista saadaan kuitenkin käämin virta katkaisijan aukeamishetkellä, sekä aika joka kuluu virran vaimetessa nolnaan. Tästä voidaan määrittää virran vaimenemisen keskimääräinen nopeus käämeille eri virtasuhteilla.

Virtojen suuruudet katkaisijan aukeamishetkellä ja keskimääräiset virtojen vaimenemiseen kuluvat ajat katkaisijan auettua on esitetty liitteessä B. Katkaisijan aukeamisesta virran vaimenemiseen kuluva aika on esitetty kuvassa 6.4.



Kuva 6.4: Virran vaimenemiseen kuluvat ajat katkaisijan aukeamishetkestä eri virtasuhteiden arvoilla.

Kuvassa 6.5 on esitetty mittauksista määritetty virran vaimenemisnopeus. Se on määritetty käämin virran suuruuden katkaisijan aukeamishetkellä ja virran vaimenemisajan suhteena.



Kuva 6.5: Virran keskimääräinen vaimenemisnopeus virtasuhteiden funktiona

Käämien 2 ja 3 virran vaimenemisnopeudet pysyivät lähes vakioarvoissa virran suuruudesta huolimatta. Käämin 2 virta vaimeni noin 209,6 A/s ja käämi 3 vastaavasti 122,1 A/s. Käämin 1 virran vaimenemisnopeus sen sijaan riippui eksponentiaalisesti käämin virrasta, ja se sai arvoja väliltä 3690 - 809 A/s virtasuhteiden 0,55 ja 0,95 välillä. Kää-

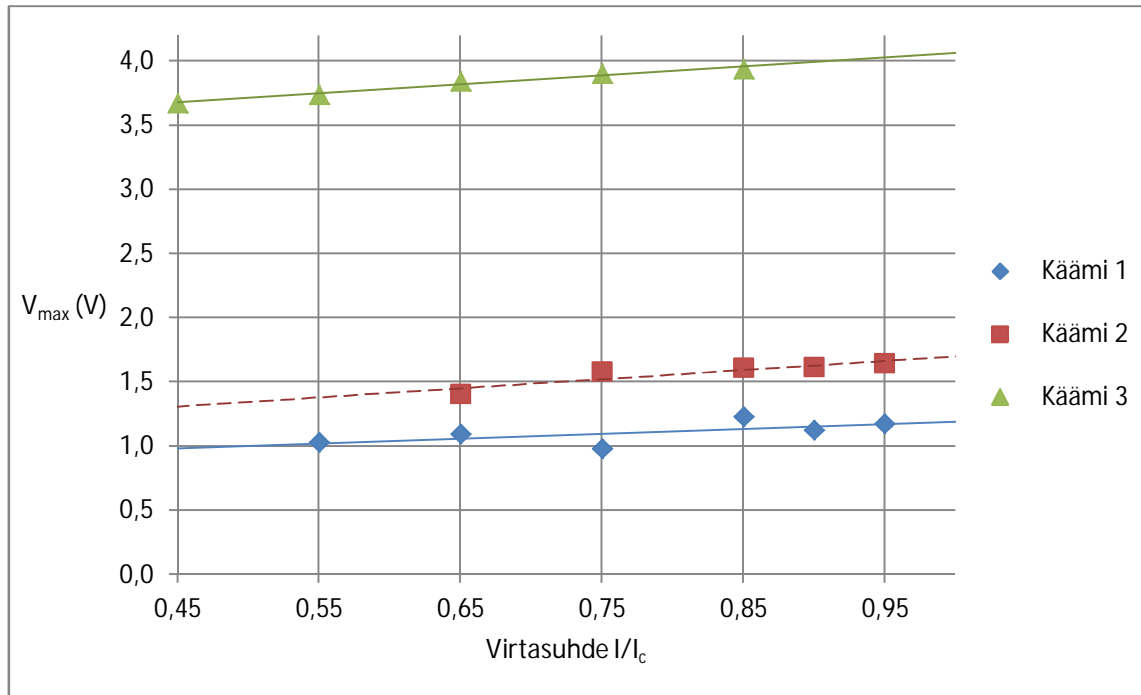
missä 1 siis oletettavasti esiintyi ilmiö, joka sai aikaan muista käämeistä poikkeavan virran vaimenemisen.

Kun suprajohtimessa esiintyy resistiivinen normaalialue, johtimessa kulkeva virta siirtyy kulkemaan matriisimetallissa. Käämeissä ydinlankojen lisäksi myös kuparikanavat oli kytketty virtalähteeseen. Tällöin osa virrasta voi siirtyä kuparikanaviin myös käämeissä 1 ja 2, vaikka niissä ydinlanka on eristetty kanavasta. Jos käämissä 1 viereisten kierrosten ja kerrosten kuparikanavien välinen sähköinen kontakti on riittävän hyvä, virta voi siirtyä kulkemaan kontakteja pitkin. Tällöin virran kulkemien kierrosten määrä pienenee, jolloin myös käämin efektiivinen induktanssi pienenee. Katkaisijan auetessa käämin efektiivinen induktanssi on ehtinyt pienentyä, minkä seurauksena virta vaimenee nopeammin. Korkeammilla virtasuhteilla suurempi virta kulkee yhä täyden kierrosmäärän katkaisijan auetessa, jolloin efektiivinen induktanssi on suurempi kuin alemmilla virtasuhteilla. Tällöin virran vaimenemisnopeus on pienempi.

Ilmiötä voitaisiin tutkia mittaamalla käämin synnyttämää magneettikenttää quenchin aikana. Mikäli käämissä 1 magneettikenttä heikkenee merkittävästi quenchin alkuhetken ja katkaisijan aukeamisen välillä käämin virran pysyessä vakiona, virran kulkeman kokonaiskierrosmäärän voidaan päätellä pienentyvän. Jos magneettikenttä pysyy lähes vakiona, virran poikkeukselliselle vaimenemiselle on olemassa jokin muu syy.

6.5 Maksimijännite

Suprajohtavassa käämissä esiintyy jännite virran muuttuessa sen induktanssin ansiosta. Virtaa kasvatettaessa jännite on pieni, mutta virran nopean muutoksen aikana esimerkiksi quenchin seurauksena jännite voi nousta suureksi. Lisäksi quenchin aikana resistiivisen normaalialueen läpi kulkeva virta saa aikaan jännitteen. Käämin induktanssin ollessa suuri virran arvo pysyy korkeana pidempään. Tällöin normaalialueen resistanssi ehtii kasvaa suureksi virran arvon pysyessä korkeana, jolloin normaalialueen yli oleva jännite voi olla suuri. Mittauksissa käytettyjen magneettien induktanssit olivat melko pieniä, minkä vuoksi quenchin aikaiset jännitteetkin jäivät odotusten mukaan hyvin pieniksi. Kuvassa 6.6 on esitetty suurimmat mitatut quenchin aikaiset jännitteet.



Kuva 6.6: Käämien suurimmat mitatut quenchin aikaiset napajännitteet.

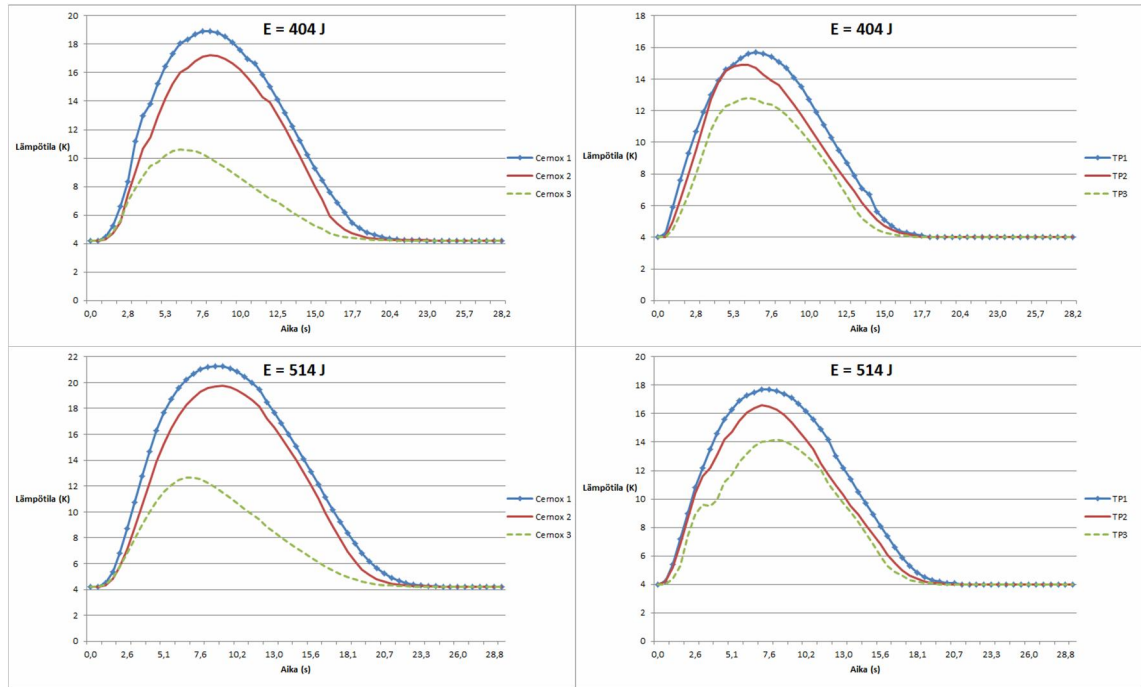
Käämin 3 jännitteet olivat selvästi kahta muuta käämiä suuremmat, mutta siitä huolimatta käytännön kannalta erittäin pienet. Turvallisuuden ylärajana pidetään tyypillisesti kilovoltin kokoluokan jännitteitä [6, s. 2], joita voi esiintyä lähinnä suuremmissa magneeteissa.

6.6 Lämpötilan nousu

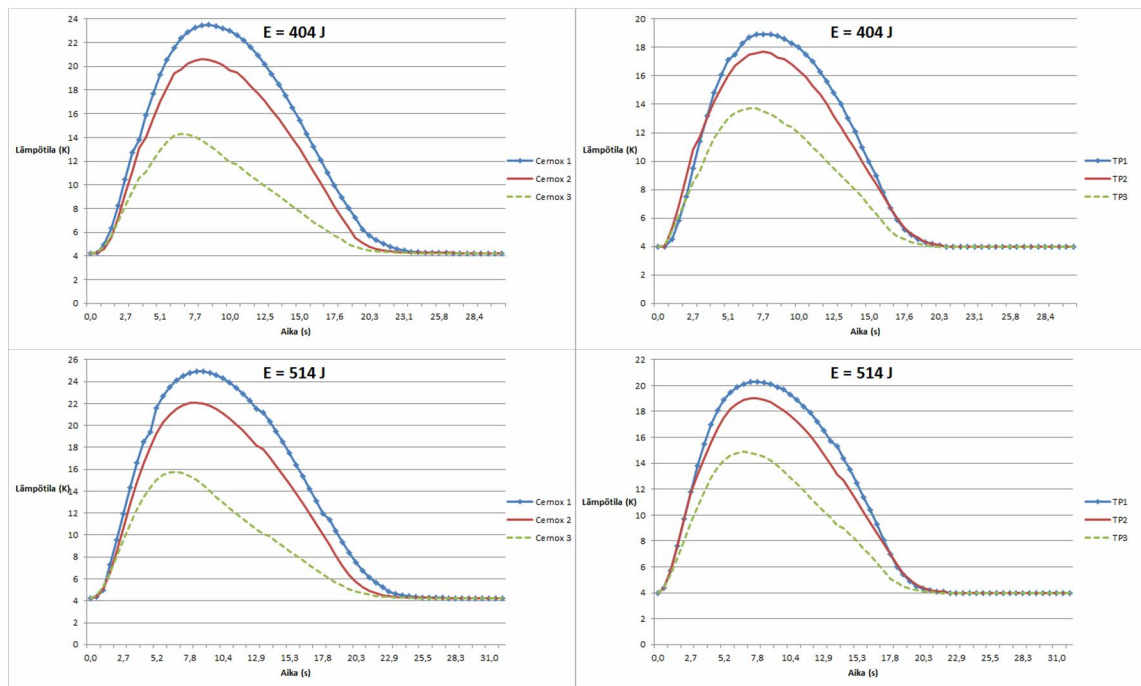
Mittauksissa saavutetut suurimmat lämpötilat olivat myös laskettuja arvoja erittäin paljon pienemmät. Oletettavasti lämpöä siirtyi merkittävästi käämin ulkoreunasta nesteheliumiin, jolloin tilanne ei ollut oletusten mukaisesti täysin adiabaattinen. Lisäksi quenchin aikainen kytkentä sisälsi käämin ulkopuolista resistanssia virtajohtimissa ja erityisesti diodissa, jolloin kaikki käämin energia ei siis vapautunut käämin tilavuudessa.

Lämpötiloja mitattiin kaikkien mittausten yhteydessä. Quenchista johtuvaa lämpötilan nousua tarkasteltaessa vertaillaan tilanteita, joissa käämeihin varastoitunut energia oli suunnilleen yhtä suuri. Tällöin voidaan vertailla tietyn energiamäärän aiheuttamaa lämpötilojen nousua ja lämpötilajakaumaa käämeissä.

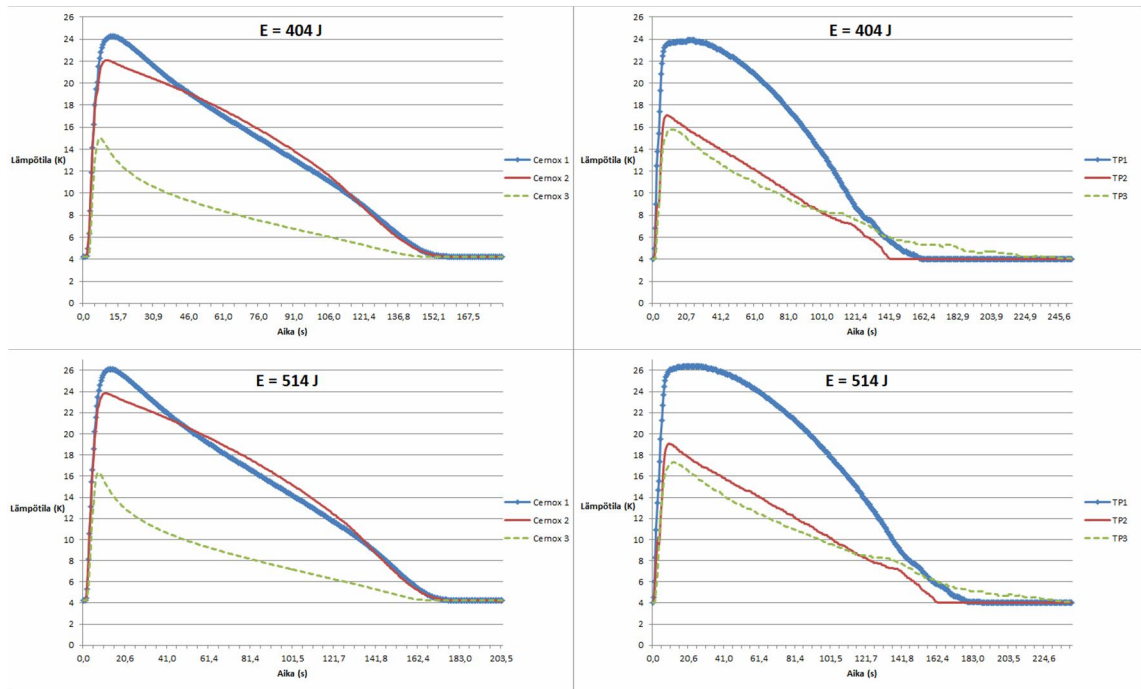
Tarkasteltavia tilanteita ovat siis mittaukset, joissa käämien energiat olivat noin 404 J ja 514 J. Lämpötiloista tarkastellaan sekä käämien sisäisiä lämpötilaeroja että verrataan eri käämien välisiä korkeimpia mitattuja lämpötiloja. Kuvissa 6.7 – 6.9 on esitetty käämien quenchin aikaiset lämpötilat eri vakioenergioiden arvoilla.



Kuva 6.7: Käämin 1 quenchien aikaiset Cernox- antureiden ja termoparien näyttämät lämpötilat.



Kuva 6.8: Käämin 2 quenchin aikaiset lämpötilat eri vakioenergioilla.



Kuva 6.9: Käämin 3 lämpötila-anturien lukemat quenchin aikana tietyillä käämien energioiden arvoilla.

Lämpötilojen huippuarvon saavuttamiseen käämeissä kuluu kokoluokaltaan noin 10 – 20 sekuntia edellä esitetyissä tapauksissa. Käämissä 3 lämpötilan aleneminen takaisin nesteheliumin lämpötilaan on kuitenkin paljon hitaampaa, mistä johtuu sen poikkeava käyrämuoto.

Vaikka vierekkäisten Cernox- antureiden etäisyys toisistaan on lähes yhtä suuri, kahden sisemmän anturin (Cernox 1 – Cernox 2) välinen lämpötilaero on merkittävästi pienempi kuin kahden ulomman (Cernox 2 – Cernox 3). Ero selittyy mahdollisesti Cernox 3-anturin ympäristössä tapahtuvasta tehokkaammasta jäähtymisestä. Lämpöä siirtyy siis nesteheliumiin merkittävästi, mikä tarkoittaa että täysin adiabaattisen tilanteen oletus ei pidä paikkaansa.

Korkeimmat mitatut lämpötilat on esitetty taulukossa 6.3. Mitatut huippulämpötilat on jaettu Cernox- antureiden mittaamiin sekä termopareilla mitattuihin. Termoparien lämpötilalukemia voidaan pitää merkittävästi Cernox- antureiden lukemia epätarkempina. Mitatut huippulämpötilat saatiin poikkeuksetta antureista Cernox 1 ja TP1.

Taulukko 6.3: Mitatut huippulämpötilat quenchien aikana käämeihin varastoituneiden energioiden ollessa yhtä suuria.

E = 404 J			
	Virta (A)	Cernox, T_{max} (K)	Termopari, T_{max} (K)
Käämi 1	204,6	18,9	15,7
Käämi 2	204,6	23,5	18,9
Käämi 3	197,0	24,3	23,9
E = 514 J			
Käämi 1	230,2	21,3	18,1
Käämi 2	230,2	24,9	20,3
Käämi 3	223,8	26,1	26,4

Käämin 3 suuremman energian lukemia lukuun ottamatta Cernox- antureiden lämpötilat olivat termopareja suuremmat. Oletettavasti kuitenkin termoparin TP1 todellinen lämpötila on suurempi kuin Cernox 1- anturin, sillä se sijaitsee käämin sisäsäteellä korkeuden puolessavälissä lähellä *heateria* ja siten quenchin alkupistettä.

Taulukkoon 6.4 on koottu käämien suurimmilla virroilla saavutetut lämpötilojen arvot. Suurimmat lämpötilojen arvot mitattiin myös antureilla Cernox 1 ja TP1.

Taulukko 6.4: Korkeimmat kokeiden aikana mitatut lämpötilat.

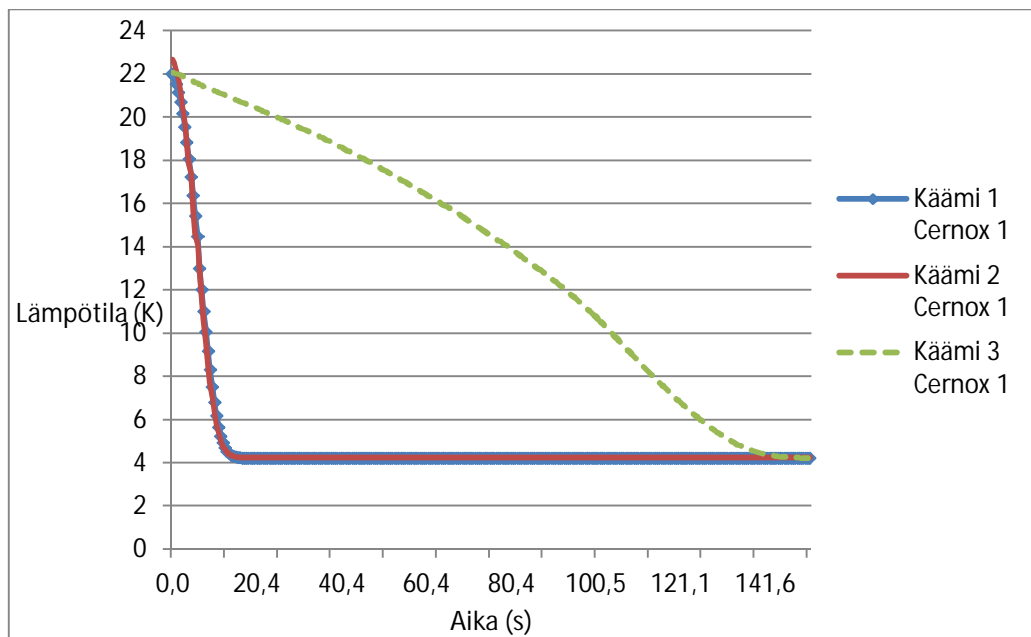
	Virta (A)	Cernox, T_{max} (K)	Termopari, T_{max} (K)
Käämi 1	245,5	22,6	19,0
Käämi 2	238,7	25,5	20,9
Käämi 3	298,6	28,8	30,7

Vakioenergian mittauksiin nähden suuremmista virroista huolimatta lämpötilat eivät kasvaneet paljon. Tämä tuli ilmi erityisesti käämin 3 tapauksessa, missä virran kasvaessa yli 100 A huippulämpötilat kasvoivat vain noin 4,5 K Cernox- antureilla ja 6,8 K termopareilla mitattuna. Kappaleen 3 adiabaattisen mallin mukaan huippulämpötilan

tulisi nousta yli 40 K. Tämänkin perusteella voidaan siis olettaa ettei käämi ollut adiabaattinen quenchin aikana.

6.7 Lämpötilan palautuminen ja jäähtyminen

Lämpötilan palautumista takaisin nesteheliumin lämpötilaan tarkastelemalla voidaan vertailla käämien lämmönjohtavuuksia. Tarkasteltavaksi mittaukseksi valittiin tilanne, jossa quenchin jälkeinen suurin mitattu lämpötila oli suunnilleen yhtä suuri kaikissa käämeissä. Kyseinen tilanne on esitetty kuvassa 6.10.



Kuva 6.10: Quenchin jälkeinen lämpötilan aleneminen noin lämpötilasta 22 K takaisin nesteheliumin lämpötilaan.

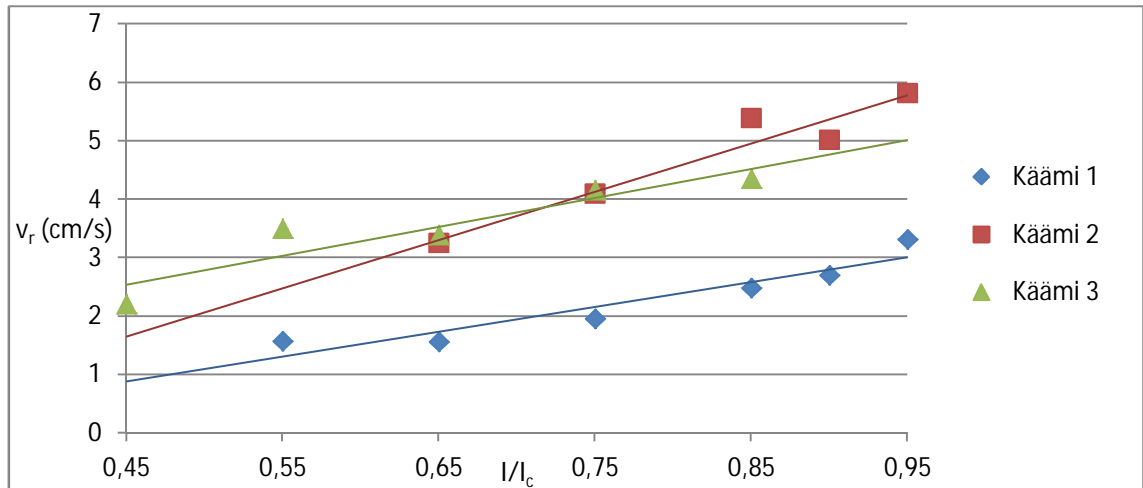
Oletetun mukaisesti käämit 1 ja 2 jäähtyivät käämiä 3 nopeammin. Merkittävää eroa käämien 1 ja 2 välillä ei nähty, mutta ero käämiin 3 oli erittäin suuri. Käämien 1 ja 2 jäähtymiseen kului noin 15 sekuntia ja käämillä 3 puolestaan noin 2,5 minuuttia.

6.8 NZP- nopeuden määrittäminen

Normaalialueen etenemistä pyrittiin seuraamaan lämpötilojen muutosten ja käämin jännitteiden avulla. Käämin osan voidaan olettaa olevan normaalitilassa lämpötilamittauksen ylittäessä niobititaanin kriittisen lämpötilan. Mittaukset tehdään kuitenkin käämin pinnalta, ja puolet lämpötila-antureista on epätarkkoja termopareja, mikä vaikuttaa tulosten tarkkuuteen ja kattavuuteen.

Cernox- anturit sijaitsevat käämin säteen suuntaisessa linjassa käämin päällä. Tällöin niiden lämpötilojen perusteella voidaan määrittää käämin säteen suuntainen normaalialueen etenemisnopeus. Myös termoparit on sijoitettu käämin säteen suuntaiselle linjal-

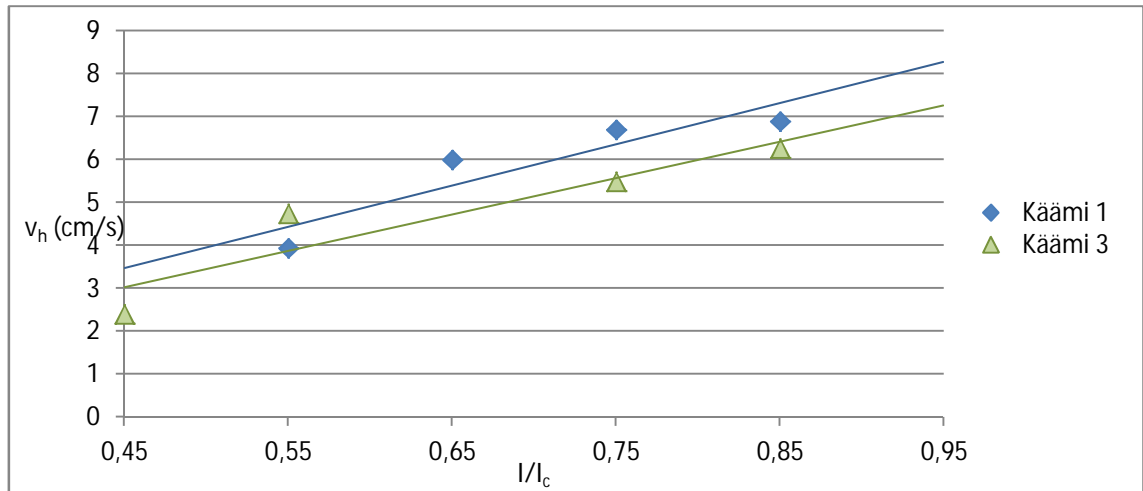
le. TP2 ja TP3 on sijoitettu käämin päälle siten, että TP2 on käämin sisäsäteellä ja TP3 säteen suuntaisen paksuuden puolella välissä. Myös niiden perusteella voidaan siis määrittää käämin säteen suuntainen normaalialueen etenemisnopeus. Mittausten perusteella määritetyt normaalialueiden etenemisnopeudet on esitetty liitteessä C. Käämien säteen suuntaisia normaalialueiden etenemisnopeuksia on havainnollistettu kuvassa 6.11.



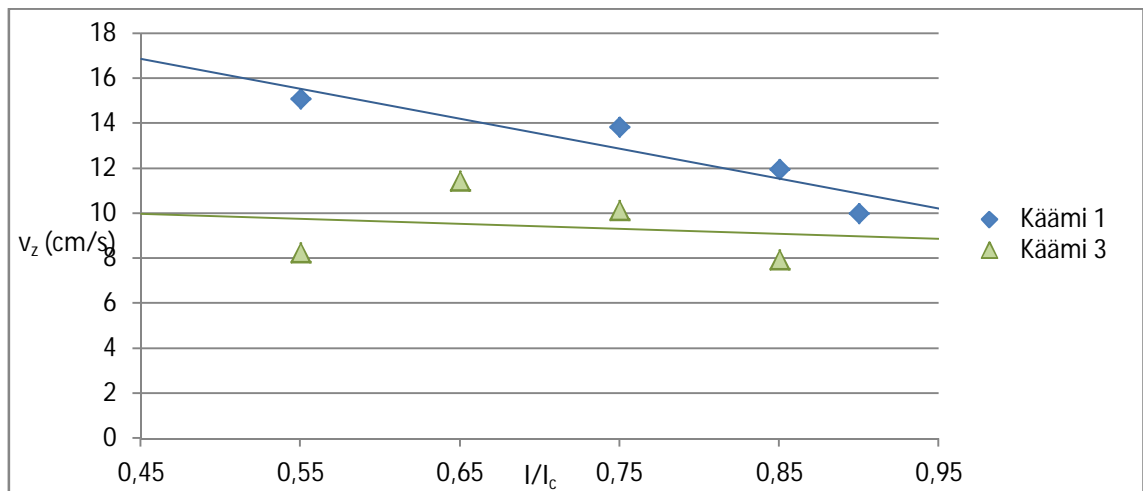
Kuva 6.11: Lämpötilamittausten perusteella määritetyt normaalialueen etenemisnopeudet käämin säteen suunnassa.

Adiabaattisen mallin mukaan normaalialueen etenemisnopeuden tulisi olla nopein käämissä 1 ja hitain käämissä 3. Mittausten mukaan kuitenkin normaalialue etenee säteen suunnassa hitaimmin käämissä 1. Alle 0,75 virtasuhteen arvoilla käämin 3 normaalialueen säteen suuntainen etenemisnopeus on käämiä 2 suurempi, mutta sen yläpuolella tilanne on päinvastainen.

Termopari TP1 sijaitsee käämin sisäsäteellä sen korkeuden puolessavälissä. Teoriassa siis antureiden TP1 ja TP2 lukemista voidaan määrittää käämin akselin suuntainen normaalialueen etenemisnopeus. Kyseiset etenemisnopeudet on esitetty kuvassa 6.12. Anturit Cernox 1 ja TP2 sijaitsevat käämin päällä ja sisäsäteellä, ja anturit Cernox 2 ja TP3 suunnilleen käämin paksuuden puolessavälissä. Anturiparien lukemista voidaan siis teoriassa määrittää johtimen pituussuuntainen normaalialueen etenemisnopeus. Johtimen suuntainen normaalialueen etenemisnopeus on esitetty kuvassa 6.13.



Kuva 6.12: Käämin akselin suuntaiset normaalialueen etenemisnopeudet.

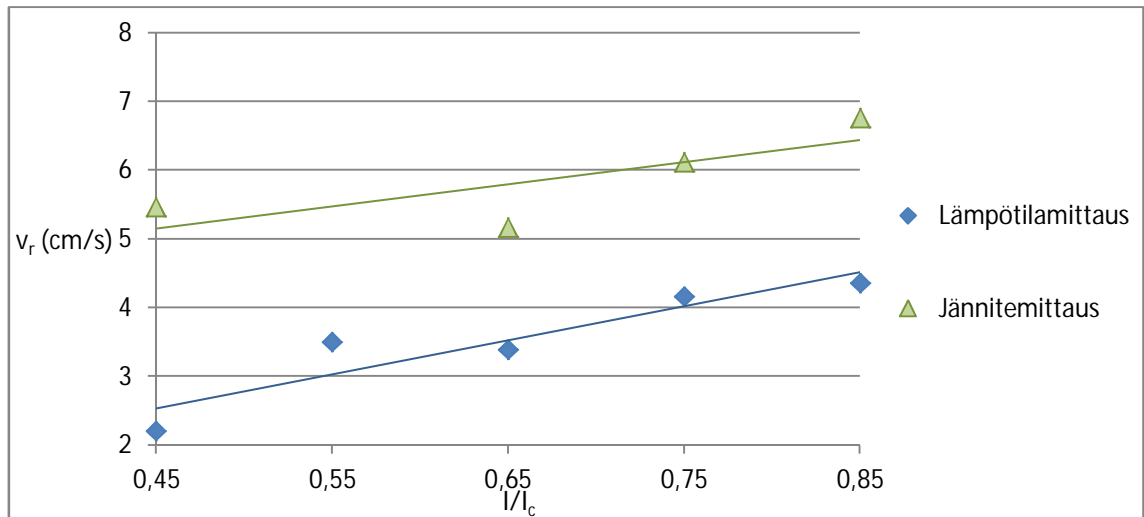


Kuva 6.13: Johtimen suuntainen normaalialueen etenemisnopeus.

Termoparien lämpötilamittauksista ei saatu käämin 2 tapauksessa määritettyä etenemisnopeuksien arvoja käämin akselin ja johtimen pituuden suunnassa. Samalla menetelmällä määritetyt etenemisnopeudet saivat sekä positiivisia että negatiivisia arvoja ja suuruudet olivat kymmen- ja jopa satakertaisia käämeihin 1 ja 3 nähden. Oletettavasti käämin 2 termopareille siis tapahtui jotain käämien viimeistelyn tai jäähtytyksen yhteydessä, koska niiden antamat lyhyen aikavälin mittaukset vaihtelivat voimakkaasti. Pidemmällä aikavälillä kuvassa 6.8 lukemissa ei näy häiriöitä.

Myös jännitteen avulla voidaan tarkastella normaalialueen etenemistä. Johtimen siirtymässä resistiiviseen tilaan käämin sisällä alkaa esiintyä jännitteitä. Suoritetuissa mittauksissa mitattiin käämin napajännitteen lisäksi sen ulomman puolikkaan jännitettä. Quenchin alettua käämin navoissa näkyy normaalialueen yli oleva jännite, mutta käämin puolikkaan mittauksessa jännite näkyy vasta kun normaalialue on levinnyt ulomman puolikkaan tilavuuteen. Tällöin aikaero nolosta poikkeavien jännitemittausten välillä vastaa

aikaa, joka normaalialueella kestää kulkea noin puolet käämin säteen suuntaisesta pak-suudesta. Jännitemittauksen perusteella määritetty etenemisnopeus on esitetty kuvassa 6.14 käämille 3. Kuparikanavaan muodostuvien pyörrevirtojen vuoksi käämeissä 1 ja 2 näkyi jännite molemmissa mittauksissa heti quenchin alettua, jolloin sen perusteella ei voitu määrittää normaalialueen etenemistä.



Kuva 6.14: Käämin 3 säteen suuntainen normaalialueen etenemisnopeus jännite- ja lämpötilamittausten perusteella määritettynä.

Jännitemittauksessa esiintyi kohinaa, mikä vaikeutti jännitteen todellisen nolasta poikkeamisen ajanhetken määrittämistä. Jännitemittauksella määritetyt arvot ovat myös noin 1,5 – 2 kertaisia lämpötilamittauksien mukaisiin arvoihin.

6.9 Lämmönjohtavuuden laskettu arvo

Kappaleessa 3 esitetystä mallista ei saada käänteisesti määritettyä käämin akselin ja säteen suuntaista lämmönjohtavuutta, koska mittaustilanne poikkesi merkittävästi mallille asetetuista oletuksista.

Mitattuja MQE- arvoja vastaavat säteen suuntaiset lämmönjohtavuudet mallinnuksen keskimääräisessä lämpötilassa T' käämeille 1, 2 ja 3 olivat keskimäärin noin 18,6 W/mK, 12,7 W/mK ja 5,6 W/mK, ja niiden arvot olivat kääntäen verrannolliset käämin virtaan. Noin alle 30 K lämpötiloissa lämpötilan nouseminen kasvattaa kuparin lämmönjohtavuutta kuvan 3.4 tapaan, jolloin suuremmilla virroilla saavutettavien korkeampien lämpötilojen ansiosta lämmönjohtavuuden voisi olettaa kasvavan.

Lämpötilojen perusteella lasketuista NZP- nopeuksista kääntäen laskettuna käämien 1 ja 3 säteen suuntaisiksi lämmönjohtavuuksiksi saadaan puolestaan keskimäärin noin 0,35 W/mK ja 0,31 W/mK. Samoin kuin edellä, mallista kääntäen lasketut lämmönjohtavuuden arvot olivat kääntäen verrannollisia käämien virtaan, mutta arvot eivät ole siis edes samaa kokoluokkaa. Eri keinoin lasketut lämmönjohtavuudet poikkeavat toisistaan

mahdollisesti siksi, että niiden määrittämisessä käytetty adiabaattisuuden oletus ei pidä paikkaansa.

Käämin resistanssimittausten perusteella voidaan määrittää käämin resistiivisyys. Käämin johtimen poikkipinta-ala A tunnetaan ja johtimen kokonaispituus l_{tot} voidaan laskea käämin kerrosten ja kierrosten lukumäärän avulla. Tällöin johtimen resistiivisyys lämpötilan arvossa T saadaan kaavasta 6.1.

$$\rho(T) = \frac{R(T)A}{l_{tot}} \quad (6.1)$$

Resistiivisyydestä saadaan määritettyä johtimen pituussuuntainen lämmönjohtavuus k_z kaavassa 6.2a esitetyn Wiedemann-Franzin lain avulla. Ratkaistu lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona on esitetty kaavassa 6.2b.

$$L_0 T = k_z(T) \rho(T) \quad (6.2a)$$

$$k_z(T) = \frac{L_0 T l_{tot}}{R(T)A} \quad (6.2b)$$

Lämmönjohtavuuksien laskenta on esitetty liitteessä D, mutta sen arvoa ei saatu määritettyä laskennallisesti käämin 1 tapauksessa. Mahdolliset kuparikanavien väliset sähköiset kontaktit vaikuttivat myös tähän mittaukseen pienentämällä käämin napojen välistä resistanssia. Käämille 2 johtimen pituussuuntainen lämmönjohtavuus 10 K lämpötilassa on tämän perusteella noin 1183 W/mK. Käämin 1 lämmönjohtavuus on todennäköisesti lähestulkoon yhtä suuri, sillä johtimen pituussuunnassa kuparin lämmönjohtavuus on dominoivassa roolissa eikä kuparin poikkipinta-alojen osuudessa ole suurta eroa. Sen hallitsevan lämmönjohtavuuden vuoksi kyseinen mittaus vastaa käytännössä pelkän kuparin lämmönjohtavuuden, resistiivisyyden ja RRR-arvon määrittämistä. Kyseisten mittausten perusteella RRR-arvo on siis noin välillä 80 – 100.

7. YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli tutkia kolmea eri variaatiota Luvata Oy:n valmistamasta WIC-suprajohtimesta. WIC-johtimessa perinteinen pyöreä komposiittisuprajohdin, eli niin kutsuttu ydinlanka, on sijoitettu avoimeen kuparikanavaan. Jokaisesta johdintyyppistä valmistettiin yksi suprajohdemagneetti, joiden mittauksilla pyrittiin selvittämään niiden ominaisuuksia. Johtimesta, jossa kuparikanava oli täysin eristämätön, valmistettiin käämi 1. Toisessa variaatiossa kuparikanavan päällä oli ohut sähköä eristävä lakkakerros, josta valmistettiin käämi 2. Käämi 3 valmistettiin kolmannelta variaatiosta, missä kuparikanava oli eristetty PET-eristeellä. Käämeissä 1 ja 2 ydinlanka oli sähköisesti eristetty kuparikanavasta, ja käämissä 3 ei. Kaikki käämit valmistettiin *wet layer*-menetelmällä, missä käämin kyllästämiseen käytettiin Stycast 2850 FT- epoksia.

Käämeille pyrittiin selvittämään niiden quench- parametrit, lämmönjohtavuus sekä uusissa johdintyypeissä esiintyvien pyörrevirtojen suhteellinen määrä. Tarkoituksena oli arvioida johdinten soveltuvuutta mekaanisesti jäähdytettymiin suprajohdesovelluksiin. Lisäksi työssä esitettiin yksinkertainen malli suprajohdemagneetin quench- analyysille, jota käytettiin mittausohjelman suunnittelussa ja tulosten arvioinnissa.

Käämeille suoritettiin kriittisen virran mittaukset, joiden perusteella pystyttiin analysoimaan johtimien käämittävyyttä ja käämien suorituskykyä. Käämeillä päästiin erittäin lähelle johtimille suoritettujen *short sample*-mittausten arvoja. Saavutetut virrat eivät myöskään kasvaneet toistettujen mittausten myötä. Magneettien valmistuksessa ei siis esiintynyt käämin heikentymistä eikä *training*-ilmiötä. Johdin on siis erittäin hyvin käämittävää ja asettuu tukevasti paikoilleen poikkileikkauksen profiilinsa vuoksi.

Käämeissä 1 ja 2 syntyviä pyörrevirtoja pyrittiin vertailemaan virran *ramp*-nopeus testeillä. Käämissä 1 viereiset kuparikanavat ovat suorassa sähköisessä kontaktissa niiden väliin jäänyttä epoksikerrosta lukuun ottamatta. Tällöin ydinlangassa kulkevan virran muuttuessa kupariin indusoituu pyörrevirtoja, jotka synnyttävät resistiivisiä häviöitä ja nostavat käämin lämpötilaa. Käämissä 2 sähköinen kontakti on heikompi eristekerroksen vuoksi, mutta pyörrevirtojen muodostuminen on silti mahdollista. Testeistä kävi ilmi, että lämpötila nousi suurilla *ramp*-nopeuksilla käämissä 2 vain noin 45 % käämiin 1 verrattuna. Hitaimmalla *ramp*-nopeuden testillä vastaava arvo oli noin 1 %. Tulosten perusteella siis pääteltiin, että pyörrevirrat saatiin lähes eliminoitua ohuella lakkakerroksella virran kasvatusnopeuden ollessa alhainen.

Mittauksissa käämeille määritettiin pienin quenchiin johtava häiriöenergia, MQE. Saatut tulokset olivat erittäin paljon laskettuja arvoja suuremmat, ja mittausten ja laskujen

väliseen eroon on useita mahdollisia selityksiä. Oletettua suurempi käämin sisäinen lämmönjohtavuus kasvattaa käämin MQE- arvoa. Toisaalta mallinnuksessa häiriötilanteen sekä käämin oletettiin olevan adiabaattinen. Todellisuudessa kuitenkin kaikki vastuksilla tuotettu häiriöenergia ei välttämättä siirry käämiin, jolloin todellinen MQE-arvo on mittauksilla määritettyä arvoa pienempi. Erityisesti näin voitiin olettaa tilanteissa, joissa vastuksen ja johtimen välinen sähköinen kontakti menetettiin. Kyseinen tilanne esiintyi pysyvästi käämissä 3 ja tilapäisesti käämissä 2.

Käämit 1 ja 2 olivat kuitenkin erittäin stabiileja, vaikka todellinen MQE olisi vain murto-osan mitatusta arvosta. Käämin virtasuhteella 0,95 MQE- arvot olivat 120 mJ ja 95 mJ käämeille 1 ja 2. Käämin 2 MQE oli mallin mukaisesti hieman käämiä 1 pienempi, mikä johtui eristekerroksen vaikutuksesta käämin sisäiseen lämmönjohtavuuteen.

Mittauksista käytetyn kytkennän vuoksi käämeille ei saatu selkeää quenchin aikaista virran vaimenemisen käyrämuotoa. Quenchin alettua virtalähde syötti käämiä vielä 3 sekuntia ennen kuin virtalähteen ja magneetin erottava katkaisija aukesi, mikä luonnollisesti vaikutti virran käyrämuotoon. Myöskään normaalialueen etenemisestä ei voitu tehdä päätelmiä virran käyrämuodon perusteella, sillä normaalialue ehti kasvaa kyseisten 3 sekunnin aikana ennen kuin virtalähde irrotettiin magneetista. Siitä huolimatta virran vaimenemisen nopeutta pystyttiin tarkastelemaan katkaisijan aukeamishetkestä eteenpäin. Käämin 1 virta vaimeni nopeimmin ja käämin 3 virta hitaimmin. Mahdollinen tekijä virran vaimenemisen nopeudelle on kuparikanavaan muodostuvat pyörrevirrat. Käämissä 1 esiintyi runsaasti pyörrevirtoja, jotka virran nopean muutoksen aikana lämmittävät käämiä kauttaaltaan ja siten nopeuttavat quenchin normaalialueen etenemistä ja virran vaimenemista. Käämissä 2 pyörrevirtojen määrä oli pienempi, mutta silti mahdollisesti merkittävä tekijä.

Tulosten perusteella käämien 2 ja 3 virta vaimeni katkaisijan auettua lähes vakionopeudella virran alkuarvosta riippumatta. Käämin 1 virta sen sijaan riippui käänteisesti ja voimakkaasti virran alkuarvosta. Mahdollinen selitys virran käyttäytymiselle käämissä 1 on virran poikkeuksellinen jakautuminen. Normaalialueen resistanssin kasvaessa virta saattaa jakautua siirtymällä kulkemaan kierrosten ja kerrosten välillä kuparikanavien välisiä sähköisiä kontakteja pitkin. Mikäli virta siirtyy ohittamaan kerroksia ja kierroksia quenchin alettua ennen katkaisijan aukeamista, käämin efektiivinen induktanssi pienenee virran kulkemien kierrosten vähentyessä. Tällöin katkaisijan auettua virta vaimenee nopeammin. Suuremmilla virroilla suurempi virta kulkee yhä alkuperäistä reittiä pitkin, jolloin sen vaimenemisnopeus on pienempi. Työssä käytetyllä mittauskytkennällä ilmiön esiintyminen voitaisiin tutkia tarkastelemalla käämin tuottamaa magneettikenttää quenchin aikana. Jos virta jakautuu edellä esitetyllä tavalla, käämin tuottama magneettikenttä heikkenee vaikka virtalähteen syöttämä virta pysyy vakiona ennen katkaisijan aukeamista. Toisaalta jos magneettikenttä ei heikkene tavallista enempää, virran vaimenemisen nopeudelle on olemassa jokin toinen syy.

Käämeille mitattiin myös quenchin aikainen maksimijännite. Mitatut arvot olivat oletetun mukaan pienet, sillä käämien induktanssit olivat pieniä. Tällöin virta vaimenee nopeasti ennen kuin normaalialueen resistanssi kasvaa suureksi. Lisäksi johtimessa oli erittäin paljon kuparia, mikä puolestaan pienentää johtimen normaalitilan resistanssia ja siten quenchin aikaista normaalialueen yli olevaa jännitettä. Käämien suurimmat mitatut napajännitteet olivat 1,2 V, 1,6 V ja 3,9 V käämeille 1, 2 ja 3.

Lämpötilamittauksilla mitatut suurimmat arvot olivat myös paljon laskettuja arvoja alhaisemmat. Tämä osaltaan tukee oletusta käämin huonosta adiabaattisuudesta. Vaikka käytettyjen Cernox- antureiden etäisyydet viereisiin antureihin nähden olivat lähestulkoon samat, lämpötilaero käämin paksuuden puolestavälistä käämin ulkoreunaan oli suurempi kuin sisäreunaan. Tällöin siis oletettavasti lämpöä siirtyi nesteheliumiin merkittävästi quenchin aikana. Korkeimmat Cernox- antureilla mitatut lämpötilat olivat 22,6 K käämissä 1, 25,5 K käämissä 2 ja 28,8 K käämissä 3. Mitatut huippulämpötilat myös riippuivat vain heikosti käämin virrasta, mikä myös viittaa lämmön poistumiseen käämistä quenchin aikana.

Quenchin jälkeinen lämpötilan palautuminen takaisin nesteheliumin lämpötilaan oli erittäin nopeaa käämien 1 ja 2 tapauksessa. Käämin 3 jäähtyminen oli oletusten mukaan hitaampi sen paksummasta eristyksestä johtuen. Käämien 1 ja 2 välillä ei näkynyt merkittävää eroa ja ne palautuivat nesteheliumin lämpötilaan alle 30 sekunnissa. Käämin 3 palautumiseen kului niihin nähden noin 10-kertainen aika. Vaikka käämin 2 ohut eriste-kerros vaikuttaa stabiilisuuteen MQE- mittausten perusteella, sillä ei ole merkittävää vaikutusta jäähtymiseen kuluvalle pidemmällä aikavälillä.

Käämeille määritettiin NZP- nopeus lämpötilamittausten perusteella. Mittaamalla määritetyt NZP- nopeudet olivat laskettuja arvoja pienemmät. Suurimmatkin säteen suuntaiset NZP- nopeudet olivat kokoluokaltaan noin 3 – 6 cm/s siten, että käämin 1 nopeus oli hitainta ja käämin 2 nopeinta. Käämin suurempi lämmönjohtavuus kasvattaisi NZP- nopeutta, kun taas adiabaattisesta tilanteesta poikkeava ylimääräinen jäähdystysteho hidastaisi sitä. Myös NZP- nopeuden mittaukset viittaavat siis merkittävään lämmön siirtymiseen käämin ja nesteheliumin välillä.

NZP- nopeus käämin säteen suunnassa saatiin mitattua Cernox- antureilla kaikille käämeille. Oletettavasti huono käämin adiabaattisuus kuitenkin kyseenalaistaa saadut arvot. Käämin akselin ja johtimen pituuden suuntaiset NZP- nopeudet mitattiin Cernox- anturien lisäksi termoparien avulla. Tuloksissa esiintyi enemmän vaihtelua ja käämin 2 tilanteessa etenemisnopeuksille ei saatu määritettyä järkeviä tuloksia mittausten perusteella. Käämin akselin suuntainen NZP- nopeus vaihteli noin välillä 4 – 14 cm/s, ja johtimen pituussuuntainen nopeus välillä 8 – 16 cm/s. Käämille 3 pystyttiin määrittämään säteen suuntainen NZP- nopeus myös jännitemittausten perusteella. Määritetty arvo oli kuitenkin noin 1,5 – 2-kertainen lämpötilamittaukseen nähden.

Kaikkien mittausten perusteella johtimista voidaan vetää joitain johtopäätöksiä. Rakenteeltaan WIC-johtimet ovat erinomaisia kämmittäväksi, sillä niistä valmistetuissa magneeteissa ei esiintynyt heikentymistä tai *training*-ilmiötä. Johtimista valmistetut käämit olivat myös erittäin stabiileja, erityisesti käämit 1 ja 2. Käämin 2 MQE-arvo oli heikoimmillaan noin 21 % käämin 1 arvoa pienempi.

Käämien jäähtymisen perusteella niiden sisäinen lämmönjohtavuus on myös hyvä, eikä käämien 1 ja 2 jäähtymiseen kuluva ajassa näkynyt merkittävää eroa. Kuparikanaavaan syntyvien pyörrevirtojen määrä sen sijaan oli merkittävästi pienempi käämissä 2, ja niiden aiheuttama lämpötilan nousu oli korkeimmillaankin vain 45 % käämin 1 arvosta. Ylimääräisten häviöiden minimointi on tärkeää erityisesti jäähdystehon ollessa pieni, jolloin tulosten perusteella voidaan siis sanoa lakkapäällysteisen johtimen olevan varteenotettava vaihtoehto kryojäähdyttimillä toteutettuihin sovelluksiin.

LÄHTEET

- [1] Orlando, T. & Delin, K. Electronics, Power Electronics, Optoelectronics, Microwaves, Electromagnetics, and Radar. Chapter 28: Superconductivity. 2006, CRC Press. 10 s.
- [2] Wilson, M. N. Superconducting Magnets. New York, 1983, Oxford University Press. 335 s.
- [3] Iwasa, Y. Case Studies in Superconducting Magnets. Second Edition. 2009, Springer US. 682 s.
- [4] Luvata Oy. Superconductors for science, energy and healthcare. [WWW] Viitattu 10.11.2014. Osoite: http://www.luvata.com/Documents/Special%20Products/Superconductors/Luvata%20Superconductors%20brochure_US.pdf
- [5] E. Todesco. Quench limits in the next generation of magnets. Workshop on accelerator magnet superconductors, design and optimization. CERN, Switzerland, 15-16 January 2013. pp. 10-16.
- [6] Härö, E., Stenvall, A., van Nugteren, J. & Kirby, G. Hot Spot Temperature in an HTS Coil: Simulations with MIITs and Finite Element Method. DOI 10.1109/TASC.2015.2396945, Transactions on Applied Superconductivity.
- [7] Yamada, R., Wake, M., Kim, S-W. & Wands, R.H. Design and Considerations on Long Nb₃Sn High Field Magnets for Hadron Colliders. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 11(2001)1, pp. 2054 – 2057.
- [8] Eckels Engineering Inc. CryoComp version 5.2 for Windows. 2012.
- [9] Scanlan, R.M., Malozemoff, A. P. & Larbalestier, D.C. Superconducting materials for large scale applications. Proceedings of the IEEE 92(2004)10, pp. 1639 – 1654.
- [10] González, A.R. & Shen, T. Determining Stability Margins in Adiabatic Superconducting Magnets with 3-D Finite Element Analysis. Fermilab, SIST Program 2012. 21 s.
- [11] SuperPower Inc. Configuration of SuperPower 2G HTS wire. [WWW] Viitattu 8.7.2015. Osoite: <http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire>
- [12] Li, Y., Liu, L., Liu, H., Sun, X., Hong, D., Xu, D. & Wang., Y. Influence of Buffer Layer Surface Morphology on YBCO Critical Current Density Deposited

- on NiW Tapes. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 21(2011)3, pp. 2924 – 2927.
- [13] Lake Shore Cryotronics. Cernox™ temperature sensor specifications. [WWW] Viitattu 9.7.2015. Osoite: <http://www.lakeshore.com/products/Cryogenic-Temperature-Sensors/Cernox/Models/Pages/Specifications.aspx>
- [14] Rodrigues-Mateos, F., Gérin, G. & Marquis, A. Quench Protection Test Results and Comparative Simulations on the First 10 metre Prototype Diploes for the Large Hadron Collider. Magnet Technology Conference (MT14), 11.-16.6.1995, Tampere, Suomi.
- [15] Pettersson, T.S. & Lefèvre, P. The Large Hadron Collider – Conceptual design. CERN, Geneve 1995, LHC Study Group. pp. 215.
- [16] Watanabe, Kenji., Mitsuhashi, T., Nanato, N., Kim, S.B., Murase, S., Nishijima, G., Watanabe, Kazuo & Miyoshi, K. Effects of Cu Stabilizer Configuration on Thermal Stability of Nb₃Sn Composite Superconductors Under Cryocooling Condition. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 15(2005)2, pp. 3410 – 3413.
- [17] Nishijima, G., Watanabe, K., Murase, S., Katagiri, K. & Iwaki, G. Superconducting Properties and Thermal Stability of High-Strength Nb₃Sn Wire with Ta-Reinforced Filaments. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 15(2005)2, pp. 3442 – 3445.
- [18] Ghosh, A.K. & Sampson W.B. Minimum Quench Energy Measurements on Single Strands for LHC Main Magnets. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 9(1999)2, pp. 252 – 256.
- [19] Falorio, I., Young, E.A. & Yang, Y. Quench Characteristic and Minimum Quench Energy of 2G YBCO Tapes. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 25(2015)3, 5 p.

LIITE A: MQE- MITTAUSTEN TULOKSET

Taulukossa 1 on esitetty Luvata Oy:n WIC-johtimista valmistettujen käämien pienimmän quenchiin johtavan energian (*minimum quench energy*, MQE) suuruudet eri olosuhteissa. Mittaukset on suoritettu eri virroilla, joilla suhde käämin virran I ja johtimen kriittisen virran I_c välinen suhde on valitun suuruinen.

Taulukko 1: MQE- arvot käämeille eri olosuhteissa.

Virtasuhde	MQE Käämi 1 (mJ)	MQE Käämi 2 (mJ)	MQE Käämi 3 (mJ)
0,45	-	-	305
0,55	720	-	240
0,65	535	490	130
0,75	370	340	100
0,85	240	210	70
0,90	180	150	-
0,95	120	95	-
Vakio B_w			
2,16 T	370	340	240
2,44 T	180	150	130
Vakio E			
404 J	370	340	305
514 J	180	150	240
Vakio I			
222,7 A	240	210	240

LIITE B: QUENCHIN AIKAINEN VIRRAN VAIMENEMINEN

Mittauksissa käämin virta lähti nopeaan laskuun katkaisijan auettua. Taulukoissa 1, 2 ja 3 on esitetty mittauksista määritetyt virran vaimenemiseen kuluneet ajat sekä käämin virran arvo katkaisijan aukeamishetkellä. Niiden perusteella on määritetty myös keskimääräinen virran vaimenemisnopeus.

Taulukko 1. Käämin 1 virran vaimenemiseen keskimäärin kulunut aika t_0 , virran arvo I_0 katkaisijan aukeamishetkellä sekä niiden perusteella laskettu virran vaimenemisnopeus dI/dt .

Virtasuhte	t_0 (s)	I_0 (A)	dI/dt (A/s)
0,55	0,044	163,9	3689,8
0,65	0,071	183,4	2589,7
0,75	0,119	201,8	1695,2
0,85	0,203	219,3	1078,8
0,90	0,246	227,5	925,5
0,95	0,292	235,9	808,9
I_c (mittaus 1)	0,409	196,8	481,7
I_c (mittaus 2)	0,615	208,2	338,8

Taulukko 2. Käämin 2 virran vaimenemiseen keskimäärin kuluva aika t_0 , virran alkuarvo I_0 ja vaimenemisnopeus dI/dt .

Virtasuhde	t_0 (s)	I_0 (A)	dI/dt (A/s)
0,65	0,881	183,7	208,4
0,75	0,931	193,5	207,9
0,85	0,903	188,6	208,9
0,90	0,883	187,2	221,9
0,95	0,875	184,5	210,9
I_c (mittaus 1)	1,456	220,7	151,6
I_c (mittaus 2)	1,443	187,3	129,8
I_c (mittaus 3)	1,429	220,7	154,5

Taulukko 3. Käämin 3 virran vaimenemiseen kuluva aika t_0 , virran alkuarvo I_0 ja vaimenemisnopeus dI/dt .

Virtasuhde	t_0 (s)	I_0 (A)	dI/dt (A/s)
0,45	1,558	186,2	119,5
0,55	1,442	176,1	122,1
0,65	1,327	163,6	123,3
0,75	1,256	154,3	122,9
0,85	1,200	147,5	122,9
I_c (mittaus 1)	1,451	144,7	99,8
I_c (mittaus 2)	1,666	190,5	114,4

LIITE C: MITTAUKSISTA MÄÄRITETYT NORMAALIALUEEN ETE- NEMISNOPEUDET

Taulukoissa 1 – 3 on esitetty käämien lämpötilamittauksista määritetyt quenchin aikaiset normaalialueen etenemisnopeudet (*Normal Zone Propagation*, NZP). Lisäksi taulukossa 4 on esitetty käämille 3 jännitemittausten perusteella määritetty säteen suuntainen NZP- nopeus.

Lämpötila-antureina käytettiin 3 kappaletta Cernox- antureita ja 3 kappaletta termopareja. Cernox- antureita voidaan pitää tarkkuudeltaan melko hyvinä, kun taas termoparit ovat merkittävästi epätarkempia. Termoparien epätarkkuudesta johtuen määritetyt arvot käämin akselin ja johtimen pituuden suuntaisille NZP- nopeuksille vaihtelivat paljon eikä niille saatu joka tilanteessa määritettyä selkeää arvoa.

Taulukko 1: Käämien säteen suuntaiset NZP- nopeudet.

<i>Etenemisnopeus v_r (cm/s)</i>							
I/I_c	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,90	0,95
<i>Käämi 1</i>	-	1,57	1,56	1,96	2,48	2,70	3,32
<i>Käämi 2</i>	-	-	3,25	4,09	5,39	5,02	5,81
<i>Käämi 3</i>	2,21	3,50	3,39	4,16	4,36	-	-

Etenemisnopeudet kasvavat lähestulkoon lineaarisesti virtasuhteen kanssa. Lukemat poikkeavat hieman lineaarisesta suhteesta, mutta Cernox- antureiden ansiosta ne ovat mittauksista tarkimmat.

Taulukko 2: Käämien akselin suuntaiset NZP- nopeudet.

<i>Etenemisnopeus v_h (cm/s)</i>							
I/I_c	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,90	0,95
<i>Käämi 1</i>	-	3,93	5,99	6,69	6,89	13,54	-
<i>Käämi 2</i>	-	-	-	-	-	-	-
<i>Käämi 3</i>	2,40	4,74	7,31	5,48	6,26	-	-

Käämin 2 mittauksissa termoparien lukemista ei pystytty päättelemään normaalialueen etenemisnopeutta. Käämeille 1 ja 3 pystyttiin määrittämään NZP- nopeuden arvoja, ja myös ne riippuivat pääasiassa lineaarisesti virtasuhteesta. Tuloksissa oli kuitenkin huomattavasti enemmän hajontaa kuin nopeuden v_r tuloksissa.

Taulukko 3: Johtimen pituussuuntainen NZP- nopeus.

<i>Etenemisnopeus v_z (cm/s)</i>							
I/I_c	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,90	0,95
<i>Käämi 1</i>	-	15,09	-	13,83	11,96	9,99	-
<i>Käämi 2</i>	-	-	-	-	-	-	-
<i>Käämi 3</i>	-	8,24	11,43	10,12	7,92	-	-

Käämille 2 ei pystytty määrittämään myöskään selkeää johtimen suuntaista NZP- arvoa lämpötilamittausten perusteella. Samoin kuin nopeuden v_h tapauksessa, käämeille 1 ja 3 määritetyissä arvoissa oli paljon hajontaa. Tulosten perusteella johtimen pituussuuntainen etenemisnopeus riippuu paljon heikommin virtasuhteesta, ja käämin 1 tulosten mukaan se on jopa kääntäen verrannollinen.

Taulukko 4: Vertailu käämille 3 jännite- ja lämpötilamittausten perusteella määritettyä säteen suuntaisesta NZP- nopeudesta.

<i>Etenemisnopeus v_r (cm/s)</i>					
I/I_c	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85
<i>Lämpötilamittaus</i>	2,21	3,50	3,39	4,16	4,36
<i>Jännitemittaus</i>	5,47	6,19	5,17	6,12	6,76

Myös mitatuissa jännitteissä esiintyi kohinaa, mikä vaikeutti todellisen jännitteen muutoksen ajanhetken havaitsemista. Jännitemittauksilla määritetyt etenemisnopeudet olivat noin 1,5 – 2-kertaisia lämpötilamittausten tuloksiin verrattuna.

LIITE D: JOHTIMEN PITUUSSUUNTAINEN LÄMMÖNJOHTAVUUS

Käämien 1 ja 2 lämpötilaa ja resistanssia mitattiin noin 18 tunnin ajan. Mittausten aikana kryostaatissa ollut nestehelium haihtui pois, jolloin käämin lämpötila alkoi nousta. Koska kryostaatissa oli jäljellä eri määrä nesteheliumia MQE mittausten lopussa, käämit saavuttivat eri lämpötilat mittausten päättyessä. Käämin 1 lämpötila resistanssimittauksen lopussa oli noin 90 K ja käämin 2 noin 105 K.

Johtimen pituussuuntainen lämmönjohtavuus voidaan määrittää käämin resistanssin R avulla, kun tunnetaan mittaustemperatuurin T sekä johtimen kokonaispituus l_{tot} ja poikkipinta-ala A . Näiden arvojen perusteella voidaan laskea johtimen resistiivisyys ρ kaavalla 1. Lämmönjohtavuus voidaan laskea kaavassa 2 esitetyn Wiedemann-Franzin lain avulla, missä Lorentzin luku $L_0 = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ W}\Omega\text{K}^{-2}$. Siitä ratkaistu lämmönjohtavuus on esitetty kaavassa 3.

$$\rho(T) = \frac{A R(T)}{l_{tot}} \quad (1)$$

$$L_0 T = k_z(T) \rho(T) \quad (2)$$

$$k_z(T) = \frac{L_0 T l_{tot}}{A R(T)} \quad (3)$$

Käämien lasketut johdinten kokonaispituudet sekä poikkipinta-alat on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: Käämin johtimen poikkipinta-ala ja johtimen kokonaispituus.

	A (mm²)	l_{tot} (m)
<i>Käämi 1</i>	2,32	154,8
<i>Käämi 2</i>	2,41	154,8
<i>Käämi 3</i>	3,22	155,9

Resistanssin mittaukset suoritettiin ainoastaan käämeille 1 ja 2. Niille lasketut johtimen pituussuuntaiset lämmönjohtavuudet lämpötilavälillä 10 – 30 K on esitetty taulukossa 3. Lisäksi taulukkoon on sisällytetty vertailun vuoksi CryoComp- tietokannasta saadut kuparin lämmönjohtavuudet vastaavissa lämpötiloissa ja RRR- arvoilla 80 ja 100.

Taulukko 2: Käämien 1 ja 2 resistanssit, niiden perusteella määritetyt johtimen pituus-suuntaiset lämmönjohtavuudet eri lämpötiloilla ja kuparin lämmönjohtavuus RRR- arvoilla 80 ja 100.

	R (T) [mΩ]	k_z (T) [W/mK]	Cu RRR 80 k [W/mK]	Cu RRR 100 k [W/mK]
T = 10 K				
Käämi 1	5,9	2771	1230	1530
Käämi 2	13,3	1183		
T = 15 K				
Käämi 1	5,9	4156	1710	2090
Käämi 2	13,4	1761		
T = 20 K				
Käämi 1	6,2	5273	2030	2420
Käämi 2	13,5	2331		
T = 25 K				
Käämi 1	7,0	5860	2040	2370
Käämi 2	13,5	2919		
T = 30 K				
Käämi 1	8,3	5896	1890	2130
Käämi 2	13,5	3502		

Työssä käytetyistä materiaaleista kuparilla on paras lämmönjohtavuus. Oletettavaa on siis, että muita heikommin lämpöä johtavia komponentteja sisältävän johtimen lämmönjohtavuuden tulisi olla puhdasta kuparia matalampi. Kuparin RRR- arvolla noin 100 tämä pätee alle 20 K lämpötiloissa käämille 2. Yli 20 K lämpötiloissa resistanssista määritetty lämmönjohtavuus saa kuitenkin kuparia suurempia arvoja. Käämille 1 määritetyt arvot puolestaan ovat merkittävästi suuremmat kaikissa mittapisteissä.

Käämien 1 ja 2 johdinten kokonaispituudet ovat lähestulkoon yhtä suuret ja kuparin poikkipinta-alan osuudella on vain muutaman prosenttiyksikön ero. Siitä huolimatta käämille 1 mitatut resistanssit ovat suuruudeltaan vain noin 44 – 62 % käämin 2 arvois-

ta kyseisellä lämpötilavälillä. Oletettavasti pelkkä ero johtimen materiaaleissa ei selitä tätä eroa. Lisäksi resistanssin perusteella laskettu lämmönjohtavuus on paljon kuparin lämmönjohtavuutta suurempi, jolloin tulos ei ole mielekäs.

Mahdollinen selitys käämin 1 poikkeaville tuloksille on viereisten kuparikanavien välinen sähköinen kontakti. Epoksikerroksesta huolimatta kuparikanavien välillä voi olla hyviä sähköisiä kontakteja, jolloin virralla voi olla lukuisia rinnakkaisia ja johtimen kokonaispituutta lyhyempiä reittejä käämirakenteen läpi. Tällöin johdinpituuden l_{tot} käyttäminen resistiivisyyden laskemisessa antaa todellista pienempiä arvoja, jolloin Wiedemann-Franzin laista laskettu lämmönjohtavuus saa suurempia arvoja.