

# **ECR2:n suihkulinjan ja HIISIn tyhjiöpumppujen suojaus HIISIn hajamagneettikentältä**

*Pro Gradu -tutkielma, 16.8.2017*

*Tekijä:*

ARTTU VÄÄNÄNEN

*Ohjaajat:*

PAULI HEIKKINEN JA TANELI KALVAS



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO  
FYSIKAN LAITOS

## Tiivistelmä

Tässä työssä suunniteltiin HIISIn tyhjiöpumpuille ja ECR2:n injektioinjalle magneettiset suojaukset HIISIn kelojen synnyttämältä magneettikentältä. HIISIn aiheuttaman magneettikentän suuruutta ja suuntaa tutkittiin simulaatioiden ja mittausten avulla suojattavissa paikoissa.

Tyhjiöpumppujen valmistajat ovat ilmoittaneet kunkin pumpun kestävät maksimumagneettivuot radiaalisesti sekä aksiaalisesti. Tyhjiöpumpuille suunniteltiin ferromagneettiset suojat, jotka pienentävät HIISIn hajakenttää tyhjiöpumppujen kohdalla riittävästi, jotta pumput eivät ole vaarassa vaurioitua HIISiä käytettäessä. Suojiksi valittiin toisesta päästä suljetut putket, jotka koostuvat matalahiilipitoisesta rakenneteräslevystä, Fe 37 B. Suojan dimensiot ja suojateräksen paksuudet räätälöitiin jokaiselle suojattavalle tyhjiöpumpulle erikseen. Jokaiselle pumpulle valittiin teräslevyn paksuudeksi 3 mm. Tämän tekstin kirjoittamisen aikana tyhjiöpumppujen suojat on valmistettu ja ne ovat käytössä onnistuneesti.

ECR2:n ionisuihkun herkkyyttä HIISIn magneettikentälle injektioinjalla tutkittiin ionioptiikkasimulaatioiden ja mittausten avulla. Suihkulinjalle suunniteltiin ferromagneettinen suojaus, joka pienentää HIISIn hajakenttää suihkulinjan kohdalla riittävästi, jotta ECR2:n ionisuihku ei häiriinny HIISIn magneettikentän muutoksista liikaa. Suihkulinjan pöydän päällä oleva osa päätettiin suojata U:n mallisella kourulla, joka lepää teräksisen pöytälevyn päällä ja koostuu matalahiilipitoisesta rakenneteräslevystä, Fe 37 B. Kourusuojan tehokkuutta simuloitiin ja siitä päätettiin tehdä kaksikerroksinen. Molempien kerrosten teräslevyjen paksuuksiksi valittiin 3 mm. Tämän tekstin kirjoittamisen aikana suihkulinjan suojauksen valmistaminen on vielä kesken.

## Abstract

In this thesis, magnetic shieldings from the stray magnetic field of the HIISI ion source were designed for the vacuum pumps of HIISI, and the ion beam injection line of the ECR2 ion source. The magnitude and direction of the magnetic field induced by HIISI in the to-be-shielded locations was studied with simulations and measurements.

Ferromagnetic shieldings for the vacuum pumps of HIISI were designed, that should reduce the HIISI stray field sufficiently, according to the maximal axial and radial magnetic fluxes listed by the manufacturers of the vacuum pumps. The shielded vacuum pumps should be able to operate safely while HIISI is in use. The shields were chosen to be simple tubes that are capped from one end. The shielding material was chosen to be low-carbon steel Fe 37 B. The dimensions and steel thicknesses were tailored for each pump's shielding individually. The steel sheet thicknesses were chosen to be 3 mm for each of the vacuum pump shields. At the time of writing this text, the shields for the vacuum pumps have been constructed, installed and used successfully.

The sensitivity of the ECR2's ion beam from the stray field of HIISI was studied using ion optics simulations and measurements. Ferromagnetic shielding was designed for the ion beam line that should reduce the HIISI stray field on the ion beam line sufficiently, so that the disturbance on the ion beam caused by changes in the HIISI stray field is limited to acceptable amounts. The part of the ion beam line that resides on a table was chosen to be shielded with a U-shaped trough that rests on a steel table, and is made of low-carbon steel Fe 37 B. The trough-shaped shield's efficiency was simulated, and it was chosen to be two-layered. The thickness of both layers was chosen to be 3 mm. At the time of writing this text, the construction of the shielding of the ion beam line is still ongoing.

# Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Teoreettiset lähtökohdat</b>	<b>8</b>
2.1	Magneettisuuden teoria . . . . .	8
2.1.1	Magneettikentän matemaattinen merkintä . . . . .	8
2.1.2	Ferromagneettisuus . . . . .	9
2.1.3	Maxwellin yhtälöt . . . . .	11
2.1.4	Magneettikentän rajapintaehdot . . . . .	11
2.1.5	Varattu hiukkanen magneettikentässä . . . . .	13
2.2	Magneettikentän luominen . . . . .	13
2.2.1	Sähkövirran aiheuttama magneettikenttä . . . . .	14
2.2.2	Sähkömagneetti . . . . .	15
2.2.3	Sähkömagneetin luoman kentän voimistaminen . . . . .	18
2.3	Magneettikentältä suojaaminen . . . . .	20
2.3.1	Suojavaihtoehdot . . . . .	20
2.3.2	Ferromagneettinen suoja . . . . .	22
2.4	Magneettikentän simulointi . . . . .	24
2.4.1	Äärellisten elementtien metodi . . . . .	24
2.4.2	Simulaatio-ohjelmistot . . . . .	27
<b>3</b>	<b>HIISIn tyhjiöpumppujen suojaus</b>	<b>29</b>
3.1	Suojattavan magneettikentän kartoitus . . . . .	29
3.1.1	Simulaatiot . . . . .	29
3.1.2	Mittaukset . . . . .	33

3.2	Suojien suunnitelma . . . . .	35
3.2.1	Suojien muoto ja materiaali . . . . .	35
3.2.2	Teräksen paksuus ja kerrosten määrä . . . . .	36
<b>4</b>	<b>ECR2:n suihkulinjan suojaus</b>	<b>42</b>
4.1	Suojattavan magneettikentän kartoitus . . . . .	42
4.1.1	Simulaatiot . . . . .	42
4.2	Magneettikentän vaikutus ionisuihkuun . . . . .	44
4.2.1	Ionisuihkun simulointi . . . . .	44
4.2.2	Mittaukset . . . . .	47
4.2.3	Suojauskriteerien valinta . . . . .	49
4.3	Suojan suunnitelma . . . . .	50
4.3.1	Suojan muoto ja materiaali . . . . .	50
4.3.2	Suojan simulaatiot ja mittaukset . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Päätelmät</b>	<b>60</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>63</b>

# 1 Johdanto

Jyväskylän yliopiston fysiikan laitos on maailmanlaajuisesti kilpailukykyinen tutkimuslaitos muun muassa kiihdytinteknologiassa. Kiihdytinlaboratoriossa on käytössä kaksi elektroni–syklotroni–resonanssi-ionilähdettä eli ECR-ionilähdettä, ja kysynnän vuoksi kolmas on rakenteilla. ECR-ionilähteiden lisäksi kiihdytinlaboratoriossa on käytössä myös  $H^-$ -kevytionilähde LIISA. ECR on 6,4 GHz:n ECR-ionilähde, ECR2 on 14 GHz:n ECR-ionilähde ja suunnitteilla oleva HIISI tulee olemaan 18 GHz:n ECR-ionilähde. ECR-ionilähteet ovat jatkuvassa käytössä, yhteensä noin 6000–7500 tuntia vuosittain, sekä julkisen että yksityisen sektorin tutkimuksissa. Entistä intensiivisemmille ja korkeamman energian ionisuihkuille on jatkuvaa kysyntää, joten HIISI kehitetään fysiikan laitoksen tutkimuksen edistämiseksi. [1–3]

Elektroni–syklotroni–resonanssi-ionilähteet luovat ioneja kuumentamalla harvaa kaasuelektroni-seosta mikroaalloilla siten, että elektronien liike-energia kasvaa riittävän suureksi irrottaakseen kaasuatomeista elektroneja. Irronneet elektronit osallistuvat ionisoimisprosessiin ja ECR-ionilähteillä voidaan saavuttaa korkeita ionien varausasteita. Ionisuihkun ionien korkea varausaste on haluttavaa, sillä syklotronin ioneille antama maksimienergia riippuu neliöllisesti ionien varausasteesta, jolloin korkeammilla varausasteilla voidaan saavuttaa korkeamman energian ionisuihkuja. [4, 5]

Kiihdytinlaboratorion saumattoman toiminnan kannalta on tärkeää, että HIISI ja ECR2 voivat olla yhtäaikaisesti toiminnassa. Ionilähteitä käytetään vuorotellen sekä suihkun tuottamiseen että ionilähteiden itsensä tutkimiseen ja kehittämiseen. Kaikkien ECR-ionilähteiden ionisuihkut syötetään injektiolinjoja pitkin K130-syklotronille ja ionilähteet ovat injektiolinjojen pituuksien pienentämiseksi ja tilan säästämiseksi lähellä toisiaan. Aikaisissa HIISIn kokeissa huomattiin, että HIISIn keloista vuotava magneettikenttä on niin voimakas, että sen muutokset voivat häiritä ECR2:n ionisuihkua ja heikentää kyseisen suihkun intensiteettiä. Lisäksi HIISIn hajakenttä saattaa vaurioittaa HIISIn omia turbomolekyyliaripumppuja, joilla luodaan tyhjiö plasmakammioon HIISIn toimintaa varten.

ECR2:n suihkulinja ja HIISIn tyhjiöpumput täytyy siis suojata HIISIn aiheuttamalta magneettikentältä. Tässä työssä tehdään suunnitelmat kyseisille suojuksille. Suojat suunnitellaan simuloimalla HIISIn magneettikenttää sekä suojujen tehokkuutta numeerisesti äärellisten elementtien menetelmää hyödyntävillä ohjelmilla. Mittauksia tehdään HIISIn magneettikentän voimakkuudesta ja sen vaikutuksesta ECR2:n ionisuihkun siirron tehokkuuteen. Simulaatioiden ja mittausten perusteella saadaan hyvyysvaatimukset suunniteltaville suojuksille. Suojat suunnitellaan simulaatioiden avulla, ja jokainen suoja räätälöidään sen suojaamalle alueelle sopivaksi.

Luvussa 2 käsitellään magneettikenttään ja magneettiseen suojaukseen liittyvää teoriaa, luvussa 3 suunnitellaan HIISIn tyhjiöpumpuille suojaus ja luvussa 4 suunnitellaan suojaus ECR2:n suihkulinjalle.

## 2 Teoreettiset lähtökohdat

### 2.1 Magneettisuuden teoria

Tässä luvussa esitellään kaikista perustavanlaatuisimmat magneettikenttiin liittyvät yhtälöt ja matemaattiset määritelmät.

#### 2.1.1 Magneettikentän matemaattinen merkintä

Magneettikenttää käsitellään matemaattisesti kahdella vektorikentällä: magneettikentän voimakkuudella  $\mathbf{H}$  ja magneettivuon tiheydellä  $\mathbf{B}$ . Niiden välillä on yksinkertainen väliaineriippuvainen relaatio:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_r(\mathbf{H}) \mu_0 \mathbf{H}, \quad (1)$$

missä  $\mu$  on väliainekohtainen magneettinen permeabiliteetti, joka tyypillisesti jaetaan kahteen osaan: tyhjiön permeabiliteettiin  $\mu_0$  ja suhteelliseen permeabiliteettiin  $\mu_r$ , jonka suuruus on riippuvainen sekä väliaineesta että magneettikentän voimakkuudesta. Materiaaleille yleensä ilmoitetaan suhteellinen permeabiliteetti.

Sekä magneettivuon tiheys  $\mathbf{B}$  että kentän voimakkuus  $\mathbf{H}$  ovat vektorikenttiä. *Kenttäviivat* ovat eräs tapa havainnollistaa vektorikenttiä ja ne ovat erityisesti magneettikenttien kuvaamisessa suosittuja. Kenttäviiva on määritelty niin, että sen tangentti osoittaa jokaisessa pisteessä samaan suuntaan kuin vektorikenttä, jota kenttäviiva kuvaa. Saman kentän kaksi kenttäviivaa eivät siis voi leikata toisiaan. Kenttäviivoilta vaaditaan myös usein se, että viivojen lokaali tiheys on verrannollinen vektorikentän suuruuteen kyseisessä paikassa.

Magneettivuon tiheys on havaittava fysikaalinen suure. Magneettikentän vaikutusta tarkastellessa tai sen voimakkuutta mitatessa havainnoidaan magneettikenttää sen vuon tiheyden kautta. Magneettivuon tiheyden voimakas väliaineriippuvuus kuitenkin usein vaikeuttaa sen käyttöä, jolloin väliaineesta riippumaton magneettikentän voimakkuus on suoraviivaisempi tapa käsitellä magneettikenttää.

Tämä duaalinen magneettikentän määrittely osoittautuu hyödylliseksi myös esimerkiksi tarkastellessa magneettikentän käytöstä kahden eri suhteellisen permeabiliteetin omaavan materiaalin rajapinnassa, jota käsitellään luvussa 2.1.4. Magneettivuon tiheydelle ja magneettikentän voimakkuudelle määritellään molemmille omat rajapintaehdot, jolloin rajapintakäsittelyä saadaan yksinkertaistettua.



Magneettikentän kaksiosainen määrittely ja erityisesti sen tarve on sekä osasyys magneettikentän käsitteen monimutkaisuudelle että sen seuraus. Tässä työssä pyritään käsittelemään magneettikenttää mahdollisimman johdonmukaisesti.

### 2.1.2 Ferromagneettisuus

Ferromagneettisuus on yksi useista materiaalien magneettisuustyypeistä. Ferromagneettisuus on yleisin voimakkaasti magneettinen eli suuren suhteellisen permeabiliteetin (ks. yhtälö (1)) omaava magneettisuuden laji. Muita magneettisuuden lajeja ovat esimerkiksi para-, dia- ja ferrimagneettisuus, jotka on eroteltu niiden mikroskooppisen käytöksen perusteella ulkoisessa magneettikentässä. Eräs tunnetuimmista ferromagneettisista alkuaineista on rauta.

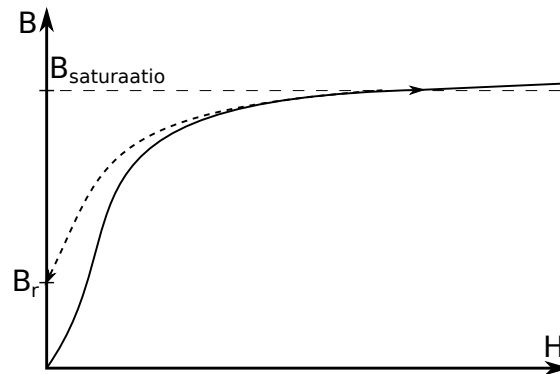
Korkean permeabiliteetin omaava materiaali tihentää materiaalin sisäistä magneettivuota voimakkaasti suhteessa magneettikentän voimakkuuteen yhtälön (1) mukaisesti. Tarkemmin sanottuna tällaiset materiaalit ovat voimakkaasti *magnetoituvia*. Voimakkaasti magnetoituvan materiaalin sisäinen rakenne järjestäytyy uudelleen ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta siten, että magneettivuo materiaalin sisällä vahvistuu. Yhtälön (1) kuvaama ilmiö voidaan esittää myös muodossa

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}), \quad (2)$$

missä  $\mathbf{M}$  on materiaalin magnetoituma.

Yksinkertaistetusti materiaalien magneettisuuden voidaan todeta seuraavan ytimeä kiertävistä elektroneista, jotka joillakin aineilla aiheuttavat yksittäisille atomeille nettomagneettikentän. Tällaiset aineet ovat yleensä sellaisia, joilla on ulkoelektroni, jolla ei ole spinin suhteen vastaparia. Atomien ominaiset magneettikentät vaikuttavat toisiin magneettikentällisiin atomeihin ja viereiset atomit pyrkivät kääntymään niin, että niiden magneettikentät osoittavat samaan suuntaan. Tästä seuraa, että materiaalin sisälle syntyy joukko paikallisia samaan suuntaan magnetoituneita alueita (engl. *domain*). Jos nämä paikalliset magnetoitumat osoittavat satunnaisesti suuntiin, keskiarvoisesti ne kumoavat toisensa ja materiaali on makroskooppisesti magnetoitumaton.

Ulkoinen magneettikenttä pyrkii kääntämään magneettisen materiaalin sisäiset paikalliset magnetoitumat ulkoisen kentän suuntaisiksi, jolloin magneettisen materiaalin sisäinen magnetoituma  $\mathbf{M}$  kasvaa. Käytännössä lähes kaikki magneettiset materiaalit säilyttävät magneettisuuttaan senkin jälkeen, kun ulkoinen magneettikenttä poistetaan. Tätä ilmiötä kutsutaan hystereesiksi, ja se monimutkaistaa magneettisten materiaalien käytöstä huomattavasti. Hystereesi tarkoittaa nykyisen tilanteen riippuvaisuutta menneisyydestä ja se johtuu siitä, että materiaalin sisäiset paikalliset magnetoitumat vaikuttavat toisiinsa ja pyrkivät asettumaan samaan suuntaan. Hystereesin takia materiaalin B–H-käyriä voisi



Kuva 1: Hahmotelma ferromagneetille tyypillisen muotoisesta B–H-käyrästä. Saturaatiossa materiaali ei voi magnetoitua enempää, joten vuon tiheys materiaalissa kasvaa vakiokulmakertoimella ulkoisen magneettikentän voimistuessa edelleen. Tällöin suhteellinen permeabiliteetti  $\mu_r = 1$  ja permeabiliteetti vastaa tyhjiötä. Katkoviivalla on esitetty hystereesi-ilmiö palattaessa saturaatiosta takaisin nollakenttään, jolloin materiaaliin jää remanenssikenttä  $B_r$ .

käytännössä olla ääretön määrä erilaisia, mutta yleensä hystereesikäyrä sisältää vain materiaalin käytöksen äärirajat.

Kuvassa 1 on esitetty hahmotelma ferromagneettisen materiaalin B–H-käyrästä, jossa hystereesi-ilmiö on esitetty katkoviivalla. Kuljettaessa kuvan käyriä nuolien suuntaisesti, osa materiaalin aiemmasta magnetoitumasta on läsnä vielä palattaessa taustakentän nollakohtaan ja materiaalissa on havaittavissa remanenssikenttä  $B_r$ . Materiaaleja, joihin jää helposti voimakas remanenssikenttä kutsutaan magneettisesti koviksi materiaaleiksi ja voimakkaan remanenssikentän omaavia materiaaleja kutsutaan kestmagneeteiksi. Teoriassa mikä vain materiaali, josta hystereesi-ilmiö on havaittavissa voi olla kestmagneetti, mutta käytännössä kestmagneeteiksi kutsutaan niitä materiaaleja, joiden magnetoitumat ovat riittävän suuria ollakseen hyödyksi jossakin sovelluksessa .

Kuvassa 1 on havainnollistettu myös saturaatiota. Materiaali on *saturoitunut* eli täysin magnetoitunut, jos kaikki sen paikalliset magnetoitumat osoittavat samaan suuntaan. Jokaiselle magneettiselle materiaalille on siis olemassa maksimimagnetoituma  $M_{\max}$ . Ulkoinen magneettikenttä kääntää materiaalin magnetoitumia samaan suuntaan sitä enemmän, mitä voimakkaampi ulkoinen kenttä on. Ulkoisen magneettikentän ollessa riittävän voimakas, jotta materiaalin magnetoituma lähestyy maksimiaansa, ei ulkoisen magneettikentän kasvattaminen entisestään magnetoitua materiaalia enää yhtä voimakkaasti. Saturaatiossa materiaalin permeabiliteetti pienenee huomattavasti, jolloin materiaalin sisäinen vuo ei reagoi ulkoiseen magneettikentän muutokseen yhtä voimakkaasti. Toisin sanoen saturoituneen materiaalin permeabiliteetti lähestyy tyhjiön permeabiliteettiä.

### 2.1.3 Maxwellin yhtälöt

Magneettikentän käytöksen tarkkaa kuvaamista varten vaaditaan vain muutama yhtälö. Näistä kaksi ovat Maxwellin yhtälöitä. Maxwellin yhtälöt ovat eräitä sähkö- ja magneettikenttien perustavanlaatuisimmista yhtälöistä. Maxwellin yhtälöitä on neljä, ja ne kuvaavat sähkö- ja magneettikenttien syntyminen ja niiden keskinäisen vuorovaikutuksen kompaktissa muodossa. Näistä neljästä yhtälöstä käsitellään vain kahta, sillä tämän työn kannalta oleellisia ovat vain magneettikentän luominen ja sen käyttö, joten sähkökenttää koskevat yhtälöt sivuutetaan.

Ensimmäinen käsiteltävä yhtälö on Maxwellin toinen yhtälö eli Gaussin laki magneettikentille:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (3)$$

Tämä yhtälö kertoo magneettivuon lähteettömyydestä ja magneettisten monopolioiden mahdottomuudesta. Magneettivuon täytyy aina olla lähteetön, eli tiettyä magneettivuon kenttäviivaa seurattaessa on lopulta palattava takaisin lähtöpisteeseen.

Toinen tarkasteltava Maxwellin yhtälö on Maxwellin yhtälöistä viimeinen ja se kertoo, miten sähkövirta muodostaa magneettikentän. Yhtälö on nimeltään Ampéren–Maxwellin laki:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (4)$$

missä  $\mathbf{H}$  on magneettikentän voimakkuus,  $\mathbf{J}$  on sähkövirrantiheys ja  $\mathbf{D}$  on sähkövuon tiheys. Tämän työn kannalta voidaan unohtaa sähkövuon tiheyden aikaderivaattatermi, sillä tarkastellaan vain stationaarisia tilanteita, joissa vakio-magneettikenttä luodaan sähkömagneetilla vakiovirralla. Saadaan yksinkertaistettu versio Ampéren–Maxwellin laista, jota kutsutaan Ampéren laiksi:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}. \quad (5)$$

### 2.1.4 Magneettikentän rajapintaehdot

Yhtälön (3) avulla voidaan johtaa helposti magneettivuon tiheyden käytös kahden materiaalin rajapinnassa. Hyödynnetään yhtälön integraalimuotoa

$$\oiint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0,$$

missä  $S$  on suljettu pinta. Olkoon nyt kaksi, erilaisen permeabiliteetin omaavaa, materiaalia kiinni toisissaan, ja valitaan suljetuksi pinnaksi  $S$  pieni kuutio materiaalien rajapinnassa siten, että kuution yhden sivun normaali on yhdensuuntainen rajapinnan normaalin kanssa. Kutistetaan kuutio rajapinnan normaalin

suunnassa infinitesimaalisen ohueksi ja kutistetaan myös kaksi muuta suuntaa riittävän pieniksi, jotta magneettivuon tiheyksiä rajapinnan molemmiin puolin voidaan pitää vakioina:  $\mathbf{B}_1$  materiaalin 1 puolella ja  $\mathbf{B}_2$  materiaalin 2 puolella. Koska kuutio litistettiin infinitesimaalisen ohueksi, litistetyt tahkot ovat vain viivoja, jolloin niiden pinta-ala on nolla ja termit katoavat. Jäljelle jää

$$\oiint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \approx \iint_{S_1} \mathbf{B}_1 \cdot d\mathbf{A} + \iint_{S_2} \mathbf{B}_2 \cdot d\mathbf{A} = 0,$$

missä  $\mathbf{B}_1$  ja  $\mathbf{B}_2$  oletettiin vakioiksi, joten ne voidaan siirtää integraalien ulkopuolille kertoimiksi. Lisäksi  $d\mathbf{A}$ -termi voidaan hajottaa normaalivektoriksi ja tavalliseksi pinta-alaksi. Koska kuutio on infinitesimaalisen ohut, ovat kaksi käsittelyssä olevaa pintaa käytännössä sama pinta, mutta eri päin. Niiden normaalivektoreille pätee siis  $\hat{\mathbf{n}}_{12} = \hat{\mathbf{n}}_2 = -\hat{\mathbf{n}}_1$ :

$$\begin{aligned} \iint_{S_1} \mathbf{B}_1 \cdot d\mathbf{A} + \iint_{S_2} \mathbf{B}_2 \cdot d\mathbf{A} &= 0 \\ \Rightarrow \mathbf{B}_1 \cdot \hat{\mathbf{n}}_1 \iint_{S_1} dA + \mathbf{B}_2 \cdot \hat{\mathbf{n}}_2 \iint_{S_2} dA &= 0 \\ \Rightarrow A (\mathbf{B}_1 \cdot \hat{\mathbf{n}}_1 + \mathbf{B}_2 \cdot \hat{\mathbf{n}}_2) &= 0 \\ \Rightarrow (-\mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2) \cdot \hat{\mathbf{n}}_{12} &= 0. \end{aligned}$$

Yleistetään tätä hieman ei-normitetulla rajapintavektorilla  $\mathbf{n}_{12}$  ja muotoillaan yhtälö yleisesti käytetympään muotoon:

$$(\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) \cdot \mathbf{n}_{12} = 0. \quad (6)$$

Toisin sanoen magneettivuon tiheyden täytyy olla jatkuva rajapinnan läpi rajapinnan normaalin suunnassa. Tämä tarkoittaa sitä, että magneettivuon tiheyden täytyy kasvaa matalan permeabiliteetin materiaalissa lähellä korkean permeabiliteetin materiaalia. Vastaavasti vuontiheys herkästi magnetoituvassa materiaalissa pienenee lähestyttäessä materiaalien välistä rajapintaa.

Vastaavanlaisella käsittelyllä yhtälöstä (4) saadaan rajapintaehto magneettikentän voimakkuudelle:

$$\mathbf{n}_{12} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = \mathbf{j}_S,$$

missä  $\mathbf{j}_S$  on rajapinnan suuntaisen sähkövirran tiheys. Koska tässä työssä tarkastellaan passiivisia magneettisia suojia vakiomagneettikentissä, voidaan virta  $\mathbf{j}_S$  olettaa nolllaksi. Pyörrevirtoja ei siis voi suojamateriaalin pintaan syntyä magneettikentän ollessa vakio, eikä suojamateriaaliin ajeta erikseen virtaa. Saadaan tässä työssä hyödyllisempi, yksinkertaistettu rajapintaehto:

$$\mathbf{n}_{12} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = 0. \quad (7)$$

### 2.1.5 Varattu hiukkanen magneettikentässä

Toisin kuin sähkökenttä, magneettikenttä ei voi lisätä varatun hiukkasen liike-energiaa. Magneettikenttä kykenee ainoastaan kääntämään jo liikkuvaa hiukkas-ta muuttamatta sen vauhtia. Sähkö- ja magneettikentät vaikuttavat varattuun hiukkaseen nk. Lorentzin voimalla:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad (8)$$

missä  $\mathbf{F}$  on hiukkaseen kohdistuva voima,  $q$  on hiukkasen varaus,  $\mathbf{E}$  on sähkökentän voimakkuus,  $\mathbf{v}$  on hiukkasen nopeus ja  $\mathbf{B}$  on magneettivuon tiheys. Yhtälön (8) perusteella magneettikentän vaikuttamiseksi hiukkasen rataa täytyy magneettivuon olla hiukkasen nopeuteen nähden kulmassa, joka ei ole  $0^\circ$  tai  $180^\circ$ . Voimakkaimmin magneettikenttä vaikuttaa hiukkaseen magneettivuon ollessa kohtisuorassa hiukkasen kulkusuuntaan, jolloin vakiomagneettikenttä pitää hiukkasen ympyräradalla. Tällöin magneettivuon aiheuttama voima toimii ympyräliikkeen keskihakuisvoimana suuruudella  $|\mathbf{F}| = qvB$ .

Magneettikenttä on erittäin hyödyllinen apuväline varattujen hiukkasten ohjaimiseen. Tämä on syy sekä sille, miksi HIIS:ssä käytetään magneettikenttää että sille miksi vuotokenttä häiritsee ECR2:n ionisuihkulinjaa. Seuraavaksi siirrytään tarkastelemaan käyttökelpoisia tapoja luoda magneettikenttää.

## 2.2 Magneettikentän luominen

Magneettikenttää hyödyntävissä sovelluksissa magneettikenttää luodaan kolmella päätavalla: kestmagneeteilla, sähkömagneeteilla ja suprajohtavilla sähkömagneeteilla. Kestomagneeteilla tarkoitetaan magneettisia materiaaleja, jotka omaavat materiaaliominaisuuksiensa vuoksi itseismagneettikentän, kun taas sähkömagneetit ja suprajohtavat sähkömagneetit hyödyntävät sähkövirran induoimaa magneettikenttää.

Kestomagneetti on monessa tilanteessa helpoin tapa hyödyntää magneettikenttää, sillä sellaisen ostaminen ja asettaminen haluttuun paikkaan riittää. Kestomagneetti on pitkällä aikavälillä edullinen vaihtoehto, koska sen käyttö ei vaadi sähkövirtaa kuten sähkömagneeteilla. Kestomagneetteja käytetään paljon monenlaisissa sovelluksissa, joissa tarvitaan vakiomagneettikenttä. Joitain esimerkkejä kestmagneettien käyttökohteista ovat sähkön generaattorit, sähkömoottori, kaiuttimet ja monet ruuvimeisselit. Kestomagneetteja käytetään myös kiihdytinfysiikassa, esimerkiksi HIIS:ssä on kestmagneetteja ohjaamassa varattuja hiukkasia heksapolin muodossa.

Kestomagneetteja on kuitenkin haastavaa käsitellä ja kuljettaa, sillä niiden magneettisuutta ei voi sammuttaa ja ne aiheuttavat jatkuvasti veto- tai hylkyvoimia ympärillään oleviin magneettisiin materiaaleihin. Tästä syystä voimakkaat kestomagneetit voivat olla jopa vaarallisia.

Sähkömagneetit erottuvat monella tavalla edukseen kestomagneettien rinnalla, mutta niilläkin on haittapuolensa. Sähkömagneettien etuja ovat esimerkiksi säädettävyys, voimakkuus ja mukautuvuus. Erityisesti kiihdytinfysiikassa, jossa generoitujen magneettikenttien voimakkuutta halutaan usein muuttella, on sähkömagneetti usein järkevin valinta, sillä niiden säädettävyys antaa niille edun kestomagneettien rinnalla. Haittapuolia ovat esimerkiksi kalleus sähkölaskujen muodossa ja se, että ne ovat monesti tilaa vieviä ja voivat vaatia enemmän valmistelua toimintakuntoon saamista varten.

Suprajohtavat sähkömagneetit mahdollistavat voimakkaampien magneettikenttien luomisen kuin mihin kestomagneetit tai perinteiset sähkömagneetit realistisesti kykenevät. Suprajohteeseen voidaan ajaa suurempia sähkövirtoja kuin tavalliseen johteeseen, sillä suprajohde ei kuumene resistiivisten häviöiden vuoksi. Suprajohtavilla sähkömagneeteilla voidaan myös luoda vakiomagneettikentän luova sähkömagneetti, joka ei kaipaa jatkuvaa virransyöttöä. Tällaisessa magneetissa kela on suljettu silmukka, johon syötettävä virtapulssi saadaan kiertämään kelaan lähes ikuisesti. Suprajohtavat sähkömagneetit vaativat kuitenkin jatkuvaa jäädyttämistä tyypillisesti nestemäisen heliumin avulla.

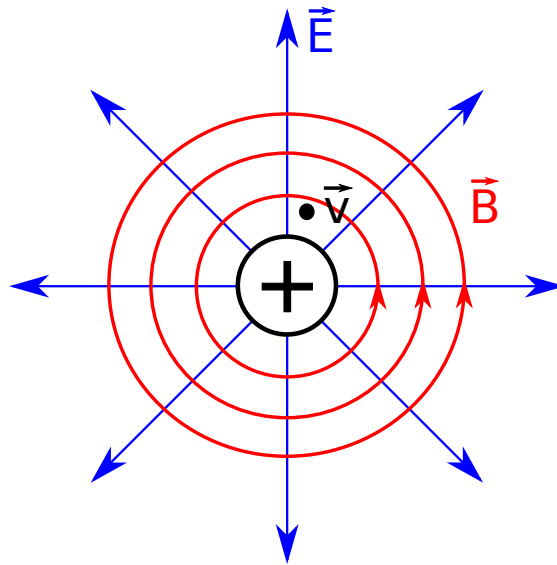
Kaikki kolme vaihtoehtoa magneettikentän luomiseksi ovat käyttökelpoisia ja kullekin sovellukselle täytyy pohtia erikseen, mikä vaihtoehtoista on sopivin. Kunkin magneettikentän luomismenetelmän hinta ja hyödyllisyys riippuvat hyvin voimakkaasti käyttökohteesta ja sen vaatimuksista.

### 2.2.1 Sähkövirran aiheuttama magneettikenttä

Varattu hiukkanen luo aina ympärilleen sähkökentän kuvan 2 mukaisesti. Varattu hiukkanen luo myös magneettikentän silloin kun se on liikkeessä. Hiukkasen ympärilleen luoman magneettikentän vuontiheys voidaan laskea Biot'n-Savartin lain mukaisesti. Yksittäisen hiukkasen aiheuttamaa magneettikenttää on kuitenkin harvemmin tarvetta tarkastella ei-akateemisissa tarkoituksissa, joten hyödyllisempi Biot'n-Savartin lain esitysmuoto on pienelle sähkövirta-alkiolle  $I d\mathbf{l}$ :

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}, \quad (9)$$

missä  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}$  on tyhjiön permeabiliteetti,  $I$  on sähkövirta,  $d\mathbf{l}$  on virta-alkion pituusvektori ja  $\mathbf{r}$  on hiukkasen ja mittauspisteen välinen vektori, jonka pituus on  $r$ .



Kuva 2: Lukijaa kohti liikkuvan positiivisesti varatun hiukkasen aiheuttamat sähkö- ja magneettikenttä.

Yhtälön (9) esitysmuoto Biot'n ja Savartin laille on kuitenkin vaikeakäyttöinen. Se vaatii, että kentän aiheuttaja on origossa, joten sitä ei voi käyttää yleisessä tapauksessa. Tästä syystä esitellään Biot'n ja Savartin laille vaihtoehtoinen, hyödyllisempi muoto mielivaltaisille virta-alkion paikalle sekä mittauspisteelle kuvan 3 mukaisesti:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \quad (10)$$

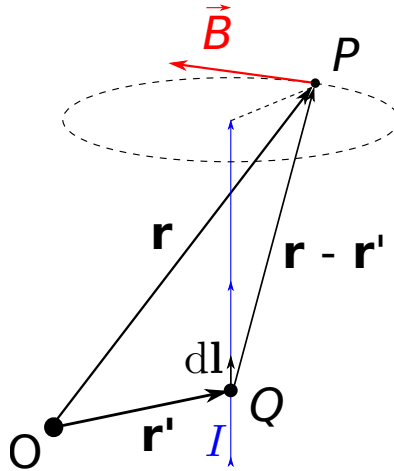
missä  $I$  on virran suuruus ja  $d\mathbf{l}$  on virta-alkion suuntavektori. Paikkavektori  $\mathbf{r}$  osoittaa origosta tarkastelupisteeseen  $P$  ja  $\mathbf{r}'$  virta-alkioon  $Q$ , jolloin vektori  $\mathbf{r} - \mathbf{r}'$  on vektori  $QP$  virta-alkiosta tarkastelupisteeseen.

### 2.2.2 Sähkömagneetti

Sähkömagneeteissa hyödynnetään sähkövirran eli liikkuvien varattujen hiukkasien synnyttämää magneettikenttää. Eräs yksinkertaisimmista sähkömagneeteista on yksittäinen virtasilmutka. Johdetaan yhtälöt virtasilmutkan synnyttämälle magneettivuolle sen keskipisteessä eli origossa ja sen jälkeen yleisemmin keskiakselilla. Olkoon virtasilmutkan keskipiste origossa ja pyörähdysakseli  $x$ -akselin suuntaisesti, sen säde  $r$  ja kulkeva virta  $I$ . Yksittäisen virta-alkion  $d\mathbf{l}$  aiheuttama kenttä saadaan yhtälöstä (10):

$$\mathbf{B}_{\text{Origo}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{d\mathbf{l} \times (-\mathbf{R})}{R^3} = -\frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{R d\theta \hat{\mathbf{e}}_\theta \times R \hat{\mathbf{e}}_R}{R^3} = -\frac{\mu_0 I d\theta}{4\pi R} \cdot (\hat{\mathbf{e}}_\theta \times \hat{\mathbf{e}}_R).$$

Tässä on kirjoitettu virta-alkion paikkavektorin  $\mathbf{R}$  ja virta-alkion suuntaisen pituuskomponentin  $d\mathbf{l}$  yksikkövektoreiden  $\hat{\mathbf{e}}_\theta$  ja  $\hat{\mathbf{e}}_R$  avulla. Huomataan, että



Kuva 3: Sähkövirran  $I$  pisteessä  $Q$  sijaitsevan lyhyen  $dl$ :n mittaisen pätkän aiheuttama magneettivuoto  $\mathbf{B}$  pisteessä  $P$ . Piste  $O$  on origo ja vektorit vastaavat yhtälöä (10).

$\hat{\mathbf{e}}_\theta \perp \hat{\mathbf{e}}_R$  ja että

$$-\hat{\mathbf{e}}_\theta \times \hat{\mathbf{e}}_R = \hat{\mathbf{e}}_x, \quad (11)$$

kaikille silmukan pisteille. Saadaan siis helposti integroitava muoto:

$$\int_0^B d\mathbf{B} = \mathbf{B}_{\text{origo}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \cdot \hat{\mathbf{e}}_x \int_0^{2\pi} d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \cdot \hat{\mathbf{e}}_x \cdot 2\pi = \frac{\mu_0 I}{2R} \cdot \hat{\mathbf{e}}_x.$$

Tarkastellaan seuraavaksi virtasilmukan aiheuttamaa magneettikenttää keskiakselilla eli  $x$ -akselilla. Nyt tarkasteltavan pisteen paikkavektori on nollavektorin sijasta  $\mathbf{x}$ . Muut vektorit ja ominaisuudet pysyvät samoina. Yhden virta-alkion aiheuttama magneettivuoto on nyt

$$\mathbf{B}_{\text{keskiakseli}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{d\mathbf{l} \times (\mathbf{x} - \mathbf{R})}{|\mathbf{x} - \mathbf{R}|^3} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{R d\theta \hat{\mathbf{e}}_\theta \times (x \hat{\mathbf{e}}_x - R \hat{\mathbf{e}}_R)}{|\mathbf{x} - \mathbf{R}|^3}.$$

Ristitulo voidaan distributiivisuuden perusteella jakaa osiin:

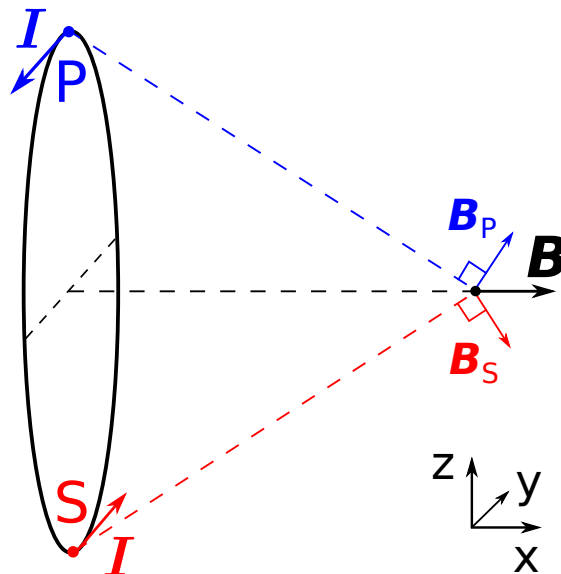
$$\mathbf{B}_{\text{keskiakseli}} = \frac{\mu_0 I R d\theta}{4\pi} \cdot \frac{x \hat{\mathbf{e}}_\theta \times \hat{\mathbf{e}}_x - R \hat{\mathbf{e}}_\theta \times \hat{\mathbf{e}}_R}{|\mathbf{x} - \mathbf{R}|^3}. \quad (12)$$

Tarkastellaan yhtälön ristituloja. Oikeanpuoleisen ristitulon integraali on jälleen helppo yhtälön (11) perusteella ja antaa tulokseksi täysin  $x$ -akselin suuntaisen magneettivuon. Huomataan, että myös  $\hat{\mathbf{e}}_\theta \perp \hat{\mathbf{e}}_x$  ja että näiden ristitulolle pätee

$$\hat{\mathbf{e}}_\theta \times \hat{\mathbf{e}}_x = -\hat{\mathbf{e}}_R, \quad (13)$$

kaikille silmukan pisteille. Tämän tuloksen vuoksi yhtälön (12) vasemmanpuoleinen ristitulo häviää integroitaessa koko ympyrän kaaren yli, sillä virtasilmukan





Kuva 4: Virtasilmukka synnyttää keskiakselilleen ( $x$ -akseli) akselin suuntaisen magneettivuon. Kuvassa on havainnollistettu, miten symmetrisen silmukan vastakkaisten pisteiden  $P$  ja  $S$  virta-alkioiden synnyttämät magneettivuot summautuvat akselin suuntaiseksi vuoksi.

keskipiste on origossa. Ympyrän kaarella jokaisen vastakkainen pisteparin ( $\theta$  ja  $\theta + \pi$ ) paikkavektorit ovat siis toistensa vastavektorit. Ympyrän kaaren vastakkaisten pisteiden virta-alkioiden indusoiman magneettivuon symmetriaa on havainnollistettu kuvassa 4 ja sen vuoksi täyden  $2\pi$ :n integroiminen antaa virtasilmukan keskiakselille  $x$ -akselin suuntaisen magneettivuon. Lisäksi yhtälön (12) nimittäjän voidaan todeta olevan vakio, sillä  $|\mathbf{R}| = R$  ja  $\mathbf{R} \perp \mathbf{x}$  kaikilla  $\mathbf{R}$  ja  $\mathbf{x}$ . Olkoon virtasilmukan kaaren polku  $S$ , jolloin saadaan:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{\text{Keskiakseli}}(x) &= \frac{\mu_0 I R}{4\pi \cdot (x^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot \oint_S (x\hat{\mathbf{e}}_R + R\hat{\mathbf{e}}_x) dS \\ &= \frac{\mu_0 I R}{4\pi \cdot (x^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot (0 + 2\pi R\hat{\mathbf{e}}_x) \\ &= \frac{\mu_0 I R^2}{2 \cdot (x^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot \hat{\mathbf{e}}_x. \end{aligned} \quad (14)$$

Virtasilmukan indusoima magneettikenttä on sen keskiakselilla siis keskiakselin suuntaisesti. Kentän suuruus pienenee siirryttäessä akselilla kauemmas silmukasta. Huomaa, miten virtasilmukan indusoiman magneettikentän vuontiheys keskiakselilla pienenee etäisyyden  $x$  suhteen kolmannessa asteessa, sähkömagneettiselle säteilylle tyypillisen toisen asteen kadon sijaan. Magneettivuon nopea harventuminen on hyödyllistä, sillä se pienentää luodun magneettikentän ei-haluttua vuotokenttää ympäristöön.

Tyypillinen sähkömagneetti on solenoidi, jonka voi ajatella koostuvan vierek-

käisistä suljetuista virtasilmukoista. Yksittäisen virtasilmukan kentän ollessa akselin suuntainen ainoastaan sen keskiakselilla, äärettömän pitkän solenoidin tapauksessa indusoitu kenttä on solenoidin akselin suuntainen kaikkialla sen sisäpuolella. Tämä voidaan selittää ajattelemalla, että kunkin pisteen magneettivuon indusoi joukko symmetrisiä virtasilmukkapareja, jossa kunkin virtasilmukkaparin summattu magneettivuon on akselin suuntainen. Symmetrisellä parilla tarkoitetaan sitä, että tarkastelupiste on virtasilmukoiden välissä yhtä kaukana molemmista silmukoista, ja silmukoiden keskiakseli on sama. Tällöin virtasilmukoiden ollessa identtiset, niiden indusoimat keskiakselia vastaan kohtisuorat magneettivuokomponentit ovat yhtä suuret, mutta vastakkaissuuntaiset. Äärellisen pituisen solenoidin magneettikentässä on reunaefektejä ja lähestyttäessä solenoidin päitä sen magneettikenttä heikkenee ja leviää ei-akselin suuntaiseksi.

### 2.2.3 Sähkömagneetin luoman kentän voimistaminen

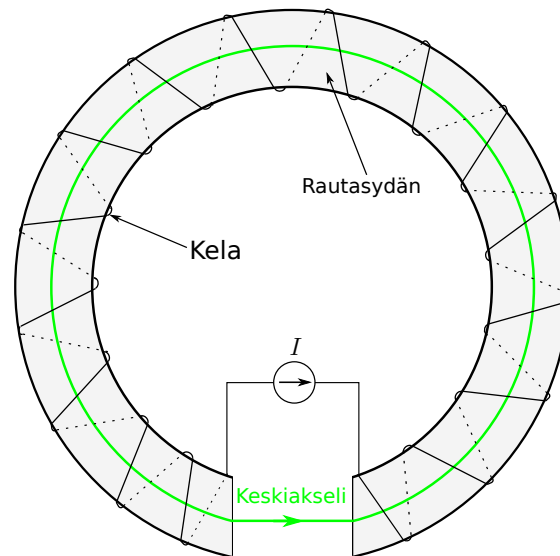
Suoraviivaisin tapa vahvistaa sähkömagneetin luomaa kenttää on kasvattaa sähkömagneetin läpi kulkevaa virtaa. Sähköjohdot kuitenkin kuumenevat ja kasvanut sähkönkulutus tulee kalliiksi, sillä sähkövirran kuluttama teho kasvaa virran suuruuden suhteen toisessa potenssissa. Yleisesti sähkömagneetin tuottamaa kenttää vahvistetaan käyttämällä hyväksi voimakkaan permeabiliteetin omaavaa materiaalia sähkömagneetissa. Tyypillinen ratkaisu on kiertää magneettikentän luova kela ferromagneettisen materiaalin ympärille. Tätä ferromagneettisesta materiaalista tehtyä keskiosaa kutsutaan monesti ”rautasydämeiksi” riippumatta siitä, onko se rautaa vai ei. Rautasydämiä käytetään sähkömagneettien lisäksi myös esimerkiksi muuntajissa hyötysuhteen parantamiseksi.

Sähkömagneetti muodostaa magneettikentän, jonka voimakkuus saadaan Ampéren laista (5). Ampéren laki vaatii sähkömagneetin luoman kentän voimakkuuden olevan tietyn suuruinen kierrettäessä suljettu silmukka. Se ei määrää paikallisia kenttien voimakkuuksia tai vuon tiheyksiä, vaan tarkan magneettikentän voimakkuuden jakautumisen selvittämiseksi tarvitaan materiaalirelaatioita yhtälön (1) mukaisesti.

Olkoon toroidin mallisen rautasydämen ympärille käärittynyt kela ja olkoon rautasydämessä pieni rako, kuvan 5 mukaisesti. Toroidin koko, kelassa kulkeva virta ja kelan kierrosten määrä määrittelevät Ampéren lain mukaisesti kokonaismagneettikentän keskiakselilla, eli käytetään Ampéren lain integraalimuotoa:

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = NI,$$

missä  $N$  on kelan kierrosten lukumäärä,  $I$  kelassa kulkeva virta,  $C$  on suljettu silmukka toroidin keskiakselia pitkin,  $\mathbf{H}$  on magneettikentän voimakkuus ja  $d\mathbf{l}$  on pituusalkio  $C$ :tä pitkin. Silmukka  $C$  voidaan jakaa rautasydämen sisällä



Kuva 5: Toroidin mallinen sähkömagneetti rautasydämellä. Sähkömagneetin tuottama kenttä halutaan alhaalla keskellä olevaan pieneen rakoön, rautasydämen tarkoitus on voimistaa sinne tuotettua magneettikenttää.

olevaan osaan ja ilmassa olevaan osaan:

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_{\text{Rauta}} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} + \int_{\text{Ilma}} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = NI.$$

Magneettivuon tiheyden rajapintaehdon (6) perusteella vaaditaan, että ilma-osaan erittäin lähellä rautasydäntä on magneettivuon tiheys vaakasuunnassa yhtä suuri kuin rautasydämen sisällä. Koska magneettikentän voimakkuus on magneettivuon tiheys jaettuna permeabiliteetilla yhtälön (1) mukaisesti ja rautasydämen oletetaan olevan erittäin suuren permeabiliteetin omaavaa materiaalia, voidaan todeta magneettikentän voimakkuuden olevan huomattavasti suurempi rajapinnan lähellä ilmassa kuin rautasydämessä. Oletetaan, että rautasydän on äärimmäisen herkästi magnetoituvaa materiaalia eli  $\mu_r \rightarrow \infty$ . Toisin sanoen magneettikentän voimakkuus rautasydämessä lähenee nollaa ja rautasydämen osuus Ampéren lain suljetusta silmukasta katoaa. Jäljelle jää

$$\int_{\text{Ilma}} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = NI.$$

Tämä tulos pätee parhaiten silloin, kun ilmarako on hyvin kapea. Tällaisella menettelyllä saadaan suuri osa magneettikentän voimakkuudesta  $\mathbf{H}$  keskitettyä haluttuun paikkaan, eli ilmarakoon. Jos toroidin rautasydän olisi ilmaa, jakautuisi toroidin tuottama magneettikenttä tasaisesti koko toroidin pituudelle ja magneettikenttä pienenesi merkittävästi. Vastaavasti umpinaisessa rautasydämessä magneettikenttä jakautuisi tasaisesti, mutta sen vuo olisi tiheämpi.

Sähkömagneetin voimakkuutta rajoittaa rautasydämessä käytetyn magneettisen

materiaalin ominaisuudet, erityisesti sen saturaatoraja. Tyypillisesti käytetyille matalahiilisille teräksille saturaatiovuo on noin 2 T. Haluttaessa siis luoda magneettivuota, jonka tiheys ylittää 2 T, usein käytetään kalliimpaa materiaalia sähkömagneetin sydämenä tai siirrytään käyttämään suprajohtavaa sähkömagneettia. Suprajohtavaan kelaan voidaan ajaa suuri määrä virtaa ja luoda voimakas magneettikenttä ylikuumentamatta johdemateriaalia.

## 2.3 Magneettikentältä suojaaminen

Magneettikenttä on monimutkainen ilmiö ja se on monesti väärinymmärretty johtuen sen epäintuitiivisuudesta. Erityisesti siltä suojatessa intuitio menee usein metsään, eivätkä päällepäin hyviltä vaikuttavat suojatkaan välttämättä auta lainkaan. Magneettikentältä suojaamista varten magneettisuus täytyykin ymmärtää hyvin. Tässä luvussa pyritään torjumaan suurimmat väärinkäsitykset magneettikentältä suojaamisesta ja käydään läpi tärkeimmät asiat, jotka vaaditaan magneettisen suojaamisen käsittelyä varten.

Aiheesta kiinnostunut lukija ohjataan tutustumaan Kaiserin loistavaan kirjaan yleisestä sähkömagneettisesta suojaamisesta [6]. Lyhyt katsaus kerrossuojaamisen etuihin löytyy lähteestä [7].

### 2.3.1 Suojavaihtoehdot

Magneettikentältä suojatessa suojan materiaalin valintaan vaikuttavat pääasiassa häiritsevän magneettikentän voimakkuus ja säännöllisesti muuttuvan magneettikentän tapauksessa sen taajuus. Käytännössä kaikki käyttökelpoiset suojausvaihtoehdot perustuvat suojattavan alueen ympäröimiseen suojaavalla materiaalilla. Korkealla taajuudella muuttuvilta magneettikentiltä suojatessa voidaan hyödyntää magneettikentän johteeseen indusoimia pyörrevirtoja ja käyttää suojamateriaalina sähkövirtaa hyvin johtavaa materiaalia. Materiaalin johtavuudella ei ole kuitenkaan mitään merkitystä vakiomagneettikentältä suojaamisessa, vaan kenttä läpäisee esimerkiksi kuparin lähes muuttumattomana. Vakiomagneettikentältä on haastavaa suojata, koska sillä on taipumus vuotaa erittäin hyvänkin suojan läpi. Se on kuitenkin tämän työn tarkoitus.

Sähkökentältä suojaaminen on useimmille tutumpi asia kuin magneettikentältä suojaaminen, ja asiaan perehtymättömälle ensimmäinen ajatus onkin käyttää Faradayn häkkiä vastaavaa ratkaisua. Faradayn häkin toimintaperiaate perustuu sähkökentän vaikutukseen varauksenkuljettajiin. Sähkökenttä aiheuttaa johteessa varauksenkuljettajien distribuution epähomogenoitumisen. Tämä varattujen hiukkasten epätasapaino synnyttää johtavan materiaalin sisälle sähkökentän, joka eliminoi ulkoisen sähkökentän. Lorentzin voimaa (8) tarkastelemalla on

kuitenkin helppo huomata, ettei magneettikenttä toimi yhtä suoraviivaisesti. Suojattavan alueen ympäröiminen korkean permeabiliteetin omaavalla materiaalilla on kuitenkin tehokas keino suojata ulkoiselta magneettikentältä, mutta täysin eri syystä kuin miksi Faradayn häkki suojaa sähkökentältä.

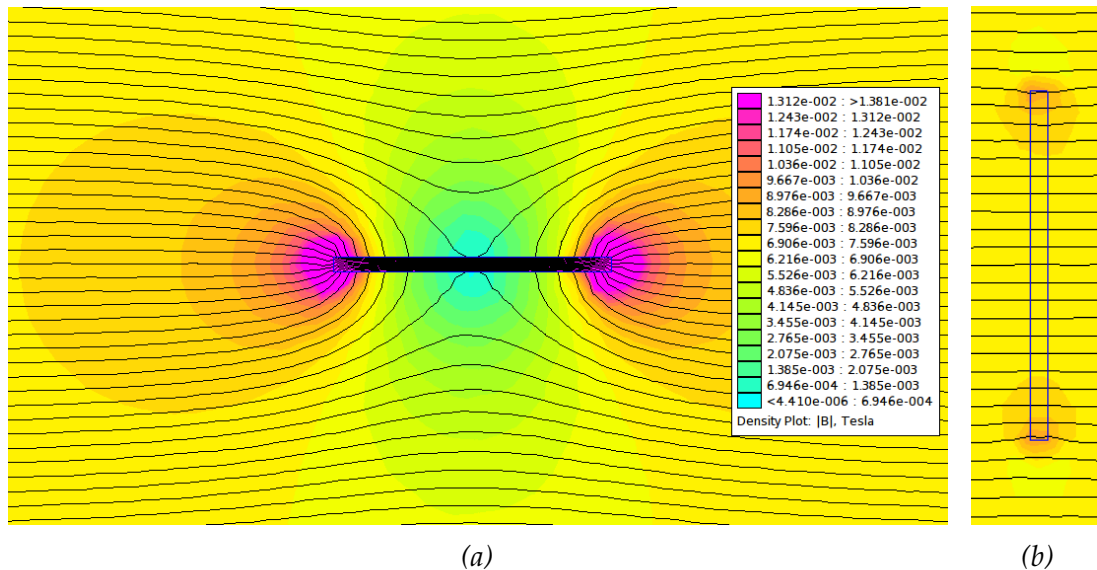
Toinen ehdotus, joka monille tulee mieleen suojausvaihtoehtoja pohtiessa on häiriömagneettikentän eliminoiminen vastakkaissuuntaisella magneettikentällä. Tämä lähestymistapa on teoriassa mahdollinen ja joissain tilanteissa käytökelpoinen, mutta yleisessä tilanteessa tämä on käytännössä liian haastava tapa suojata magneettikentältä.

Yhtälöstä (3) voidaan päätellä Helmholtzin teoreeman perusteella, että magneettikenttä koostuu yksinomaan roottorikomponenteista. Toisin sanoen magneettikenttä on aina puhtaasti pyörteinen vektorikenttä. Tästä seuraa se, että magneettikenttä on erittäin harvoin yksinkertaisen mallinen missään makroskooppisessa tilavuudessa. Ainoastaan kaukana magneettikentän synnyttämästä lähteestä on magneettikenttä lokaalisti lähes homogeeninen, mutta kaukana magneettikentän lähteestä magneettivuon tiheys on jo useimmiten niin heikko, ettei siltä tarvitse edes suojata. Tämä johtuu siitä, että useimpien magneettikentän lähteiden vuon tiheys pienenee kolmannessa potenssissa suhteessa etäisyyteen lähteestä, kuten yhtälöstä (14) huomattiin.

Magneettikentän pyörteisyys aiheuttaa myös sen, että luodessa häiriökenttää eliminoivaa magneettikenttää on erittäin haastavaa saada luodun magneettikentän muoto samanlaiseksi kuin häiriökenttä asettamatta molempien kenttien lähteitä samaan paikkaan, mikä tuhoaisi myös sen kentän, jota varten häiritsevä kenttä alunperin luotiin. Magneettisten materiaalien läheisyydessä magneettikenttä myös vääristyy entistä haastavamman muotoiseksi.

Vastamagneettikentällä suojaamista varten täytyy siis tuntea häiriökenttää erittäin hyvin ja vaatia, ettei se muutu. Epät triviaalin magneettikentän tapauksessa siis kentän selvittämiseksi tarvitaan suuri määrä mittaamista ja kartoittamista tai hyvä simulaatio. Siinäkin tilanteessa, että häiriökenttää tunnetaan täydellisesti, useimmat magneettikentät silkalla muodollaan aiheuttavat sen, että tämä lähestymistapa on turhan vaativa ja monimutkainen. Kuitenkin esimerkiksi Maan magneettikentältä suojaamista varten se on varteenotettava vaihtoehto.

Universaalisti hyödyllinen, suoraviivainen ja usein myös edullinen tapa suojata magneettikentältä on ohjata magneettikenttä kiertämään suojattava alue korkean permeabiliteetin omaavan materiaalin avulla. Tällaisia ferromagneettisia suoja-keitä käytetään yksinomaan tämän työn magneettisissa suojauksissa. Ferromagneettisia suoja-keitä voidaan tehdä käyttäen mitä vain korkean permeabiliteetin omaavaa materiaalia ferromagneettisen materiaalin sijasta. Ferromagneettisuus on kuitenkin tunnetuin korkean permeabiliteetin magneettisuuden lajeista ja usein ferromagneettisuutta käytetään yleisterminä materiaaleille, jotka omaavat



*Kuva 6:* Vaaka- ja pystysuorassa olevat teräslevyt asetettuna homogeeniseen vaakasuuntaan kulkevaan magneettikenttään. Teräslevyt keräävät magneettivuon kenttäviivoja itseensä, joka heikentää vuon tiheyttä levyjen ylä- ja alapuolella, mutta voimistaa vuon tiheyttä muualla. Teräslevyt on merkitty sinisillä ääriviivoilla ja lopulliset magneettikentät ovat symmetrisiä teräslevyjen keskipisteiden suhteen sekä vaaka- että pystysuunnassa.

korkean magneettisen permeabiliteetin.

### 2.3.2 Ferromagneettinen suoja

Ferromagneettista suojaa suunnitellessa voi magneettivuota ajatusleikkinä rinnastaa virtaavaan tulvaveteen. Magneettikenttä on tuotettu jossakin lähteessä ja sen täytyy palata sinne, eikä sitä voi pysäyttää matkan varrella (ks. yhtälö (3)). Kuten valtava määrä tulvavettä kulkemassa alamaata kohti, vuota ei voi pysäyttää, mutta sitä voi ohjata sivuun kaivamalla syvän uoman, jossa vettä voi kulkea enemmän ja nopeammin. Tämä aiheuttaa kuitenkin sen, että uoman läheisyydessä osittain vuon määrä jopa kasvaa sillä virtaava vesi pakkautuu kapeaan uomaan. Uoman päättyessä ja virtauksen levitessä jälleen tasaiseksi distribuutioksi, täytyy vettä virrata uoman lähellä enemmän. Tätä rinnastusta ei kannata viedä kovin pitkälle, mutta mielikuvan tasolla se helpottaa muuttamaan ajatusmallia ja pääsemään irti sähkökenttämäisestä suojausajattelusta, jossa on helppoa eliminoida häiriökenttä pois.

Kuvasta 6a voi nähdä samankaltaisuuden veden virtauksen ja magneettivuon välillä. Kuvassa on asetettu teräslevy alunperin kokonaan ilmassa kulkevaan homogeeniseen magneettikenttään. Teräslevy kerää itseensä voimakkaan mag-

neettivuon magneitoitumalla. Koska magneettikenttä on lähteetön, täytyy jo olemassaoleva vuo kerätä ympäristöstä keskittämällä se teräslevvyyn, joka heikentää teräslevyn vieressä olevaa vuota. Kuitenkin levyn päiden lähellä vuo voimistuu, koska kenttäviivat ovat jatkuvia eivätkä voi tihentyä diskreetisti.

Samankaltainen teräslevy pystysuorassa ei kuitenkaan muuta magneettikenttää juurikaan, kuten kuvasta 6b voi todeta. Magneettivuon täytyy olla jatkuva rajapintaa kohtisuorassa (yhtälö (6)), joten magneettivuon suunnassa ohut teräslevy ei juurikaan kasvata vuon tiheyttä. Kuvassa oleva levy on kuitenkin riittävän paksu, jotta pientä kenttäviivojen taipumista on havaittavissa levyn päiden lähellä. Käytännössä on siis hyödytöntä yrittää asettaa seinä magneettikentän eteen siinä toivossa, että se pysäyttäisi kentän. Tällainen menettely itse asiassa saattaa jopa voimistaa kenttää siellä, missä siltä yritetään suojata, vertaa tätä tilannetta sähkömagneetin kentän voimistamismenettelyyn luvussa 2.2.3. Ohuesta kohtisuorassa olevasta ojasta tulvavesikin kulkee vaikeuksitta yli, jos oletetaan että tilanne on tasaantunut ja oja on jo valmiiksi täynnä vettä.

Magneettikentän muotoa on todella työlästä tutkia analyyttisesti jopa yksinkertaisessa asetelmassa, mutta voimme tarkastella yksinkertaista tilannetta magneettikentän käytöksen ymmärtämiseksi. Luvussa 2.1.4 käsiteltyjen rajapintaehtojen perusteella vaaditaan, että magneettivuon tiheys on jatkuva rajapinnan normaalin suunnassa ja että magneettikentän voimakkuus on jatkuva rajapinnan suunnassa. Koska tarkastelemme vakiomagneettikenttiä ja suoja, joihin ei ajeta virtaa, käytämme magneettikentän voimakkuudelle rajapintaehto (7).

Lyhyesti sanallisesti todettuna esimerkiksi ilmasta teräkseen kulkeva, rajapintaan vinossa tuleva, magneettikenttä taittuu pinnan normaalista pois päin. Tämä johtuu siitä, että magneettivuon ei voi kasvaa pinnan normaalin suunnassa, mutta voi kasvaa pinnan suunnassa. Lisäksi magneettikentän voimakkuuden täytyy olla jatkuva rajapinnan suunnassa, joten suuremman permeabiliteetin omaavassa teräksessä vuon tiheys kasvaa pinnan suunnassa ja kenttä taittuu jopa hyvin voimakkaasti rajapinnan normaalista pois päin, kuten valon poistuessa vedestä ilmaan. Tämän takia kuvassa 6a teräslevyn keskivaiheilla magneettivuon kenttäviivat tulevat jopa lähes pystysuunnassa rajapintaan ja taittuvat kulkemaan lähes teräslevyn suuntaisesti. Täysin kohtisuorassa rajapintaan tuleva magneettikenttä ei voi taittua, eikä kasvaa äkillisesti. Sen takia homogeenisessä magneettikentässä poikittain oleva ferromagneettinen levy, kuten kuvassa 6b, ei vaikuta kenttään juuri lainkaan.

Voimakkailta kentiltä suojatessa joudutaan ottamaan huomioon suojassa käytetyn magneettisen materiaalin saturoituminen. Suojamateriaali kerää kenttäviivoja itseensä enemmän tai vähemmän riippuen sen permeabiliteetin suuruudesta, mutta saturaatiossa magneettisen materiaalin suhteellinen permeabiliteetti pienenee huomattavasti. Siinä tilanteessa magneettikenttää voimistaessa suojamateriaalin ja eristemateriaalin välinen permeabiliteettiero on huomattavasti

pienempi, joten rajapinnassa tapahtuva taittuminen heikkenee ja suoja vuotaa. Suojan vuotaessa saturoitumisen takia suoraviivaisin tapa estää saturaatio on lisätä suojamateriaalia. Suojamateriaalin tilavuuden kasvattaminen antaa enemmän tilaa kenttäviivoille pakkautua suojamateriaaliin, joka pienentää paikallista vuon tiheyttä suojamateriaalissa.

Jos kuvan 6a teräslevy ohennettaisiin puoleen pystysuunnassa, magneettivuon tiheys levyn sisällä noin kaksinkertaistuisi. Suojan toimivuuden aiheuttavat efektit, eli rajapinnassa tapahtuva taittuminen ja pitkässä suojassa vuon tihentyminen pituussuunnassa keskelle suojaa eivät lakkaa toimimasta suojaa kavennettaessa. Tämän vuoksi suojan vaikutusalue pysyy lähes samana sitä ohennettaessa hie-man, ja noin saman verran kenttäviivoja pakkautuu suojamateriaaliin vaikkakin pienempään tilavuuteen, mikäli suojamateriaali ei saturoidu. Rajapinnassa tapahtuva taittuminen ja sitä myötä kentän voimistuminen rajapintaan vinossa saapuville kentille onkin pääasiassa suojan toimivuuden aiheuttava ilmiö. Suojaa suunniteltaessa on viisasta varmistaa, että suojattava magneettivuo on vinossa suojamateriaalin pintaan nähden, jotta taittuminen rajapinnassa ja magneettivuon ohjaaminen suojamateriaali pitkin voi tapahtua.

Kerrosten lisääminen ferromagneettiseen suojaan on paras tapa voimistaa suojan tehokkuutta suhteessa käytettyyn materiaaliin, sillä eristekerrosten erottelemat suojat tehostavat suojauskerrointa geometrisesti. Olkoon esimerkiksi täysin ympäröivän suojan suojakerroin  $X$ , jolloin magneettivuon tiheydeltä  $B$  suojattaessa suojatun alueen magneettivuon tiheys on  $B/X$ . Tällöin lisättäessä suojaan toinen samanlainen suoja, täysin erillään aiemmasta suojasta, saadaan uudeksi suojatun alueen magneettivuon tiheydeksi  $(B/X)/X = B/X^2$ . Tällainen suojan kerrostaminen on lähes välttämätöntä haluttaessa pienentää suojattavan alueen magneettikenttää taustakenttää kertaluokkia pienemmäksi. Tällöin on myös kannattavaa valita kunkin kerroksen suojamateriaali erikseen, sillä jokainen kerros suojaa eri suuruiselta magneettikentältä.

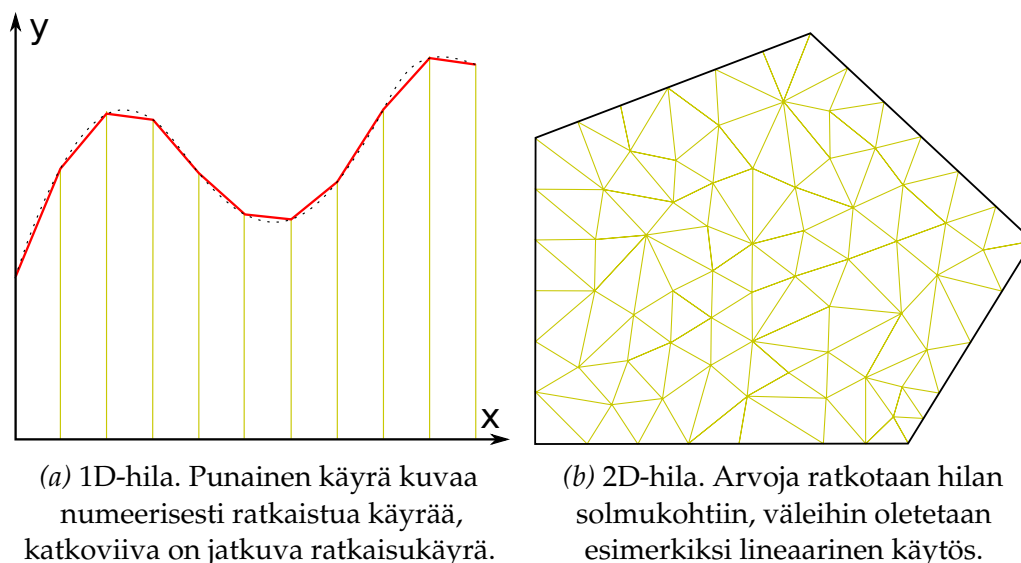
## 2.4 Magneettikentän simulointi

Magneettikenttiä on lähes mahdotonta tarkastella analyttisesti todellisissa geometrioissa, minkä vuoksi tässäkin työssä magneettikenttiä käsitellään numeeristen simulaatioiden avulla.

### 2.4.1 Äärellisten elementtien metodi

Kaikki tämän työn simulaatiot tehdään simulaatio-ohjelmilla, jotka hyödyntävät äärellisten elementtien metodia (engl. *Finite Element Method*). Äärellisten



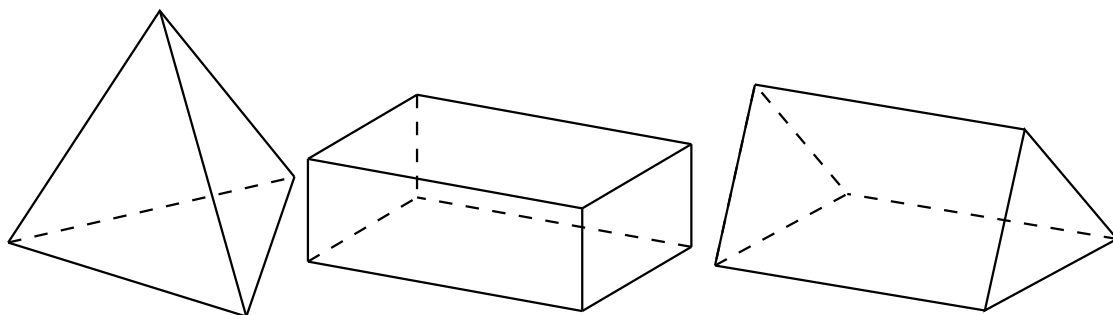


*Kuva 7:* Numeerisesti simuloitavien arvoavaruuksien jakoa väleihin eli hilaan. Hila on merkitty molempiin kuviin keltaisella, 1D esimerkissä on myös esitetty punaisella ratkaistu käyrä lineaarisella interpoloinnilla.

elementtien metodi on yleisesti käytetty, koska sillä voidaan simuloida mielivaltaisen mallisia geometrioita. Äärellisten elementtien metodilla voidaan tehdä yleissimulaatio-ohjelmia, jotka pystyvät ratkomaan monenlaisia erilaisia ongelmia. Äärellisten elementtien metodin vahvuus piilee siinä, että monimutkainen ongelma jaetaan pieniin erillisiin ongelmiin, jotka on helpompi ratkaista. Käytännössä äärellisten elementtien metodissa jaetaan ratkaistava geometria pieniin diskreetteihin osiin, joiden sisälle oletetaan yksinkertainen käytös.

Äärellisten elementtien metodin toimintaperiaate voidaan jakaa neljään vaiheeseen: ratkaisuavaruuden jako diskreetteihin osa-avaruuksiin, osa-avaruuksien sisäisten interpolointifunktioiden valinta, ongelman määrittämisen yhtälöryhmän muodostaminen ja kyseisen yhtälöryhmän ratkaiseminen. Käsitellään näitä neljää vaihetta tarkemmin.

Ratkaisuavaruuden jako pienempiin osa-avaruuksiin on äärellisten elementtien metodin keskeinen ja mahdollisesti jopa tärkein vaihe. Saatuja diskreettejä osa-avaruuksia kutsutaan elementeiksi, ja se miten jako elementteihin on tehty vaikuttaa suuresti laskenta-aikaan, muistivaatimuksiin ja tulosten tarkkuuteen. Yksi- ja kaksiulotteiset esimerkit elementteihin jaosta on esitettynä kuvassa 7. Koko elementtijakoa kutsutaan *hilaksi*, jota vastaava englanninkielinen termi on *mesh* eli verkko. Termi on kuvaava erityisesti kaksi- ja kolmiulotteisissa tapauksissa, sillä hila usein visualisoidaan verkkona, kuten kuvassa 7b. Kukin yksittäinen elementti on yhteydessä ja voi vaikuttaa ainoastaan sen viereisiin elementteihin.



*Kuva 8:* Kolmiulotteiset elementtityypit. Vasemmalta oikealle: tetraedri, tiili ja kolmioprisma.

Yksiulotteisessa tapauksessa elementit voivat olla vain välejä. Kaksiulotteisina elementteinä käytetään useimmiten kolmioita ja neliöitä. Yleisimmät kolmiulotteiset elementit ovat esitettynä kuvassa 8 ja ne ovat tetraedri, tiili ja kolmioprisma. Hilaelementteinä käytetään yleisimmin kolmioita kaksiulotteisessa tilanteessa ja tetraedreja kolmiulotteisessa tilanteessa. Kolmiossa on se hyöty nelikulmioon, että kolme pistettä muodostavat aina tason, mutta neljäs piste voi olla tason ulkopuolella. Sen vuoksi kolmio on yleiskäyttöisempi haluttaessa kuvata esimerkiksi kolmiulotteista pintaa yksinkertaisilla kaksiulotteisilla pinnoilla, ja tetraedri on monimutkaisempia elementtejä yleishyödyllisempi. Kuitenkin hilaelementtien tyyppi kannattaa valita jokaiselle sovellukselle erikseen ongelman ratkaisemisen optimoimiseksi. Usein ongelman eri osat kannattaa kartoittaa erilaisilla elementeillä.

Seuraava vaihe ratkaisemisessa on elementtien sisäisten interpolointifunktioiden valinta. Interpolointifunktio valitaan usein ensimmäisen, toisen tai korkeamman asteen polynomiksi. Ensimmäisen asteen polynominen eli lineaarinen käytös on näistä kevyin laskennallisesti ja siten usein käytetty. Kuvassa 7a on havainnollistettu eräs yksiulotteinen hila ja ratkaisukäyrä, jonka interpolointifunktio on lineaarinen. Ratkaistujen pisteiden välinen käytös oletetaan siis lineaariseksi ja saatu ratkaisu koostuu suorien palasista. Lineaarisen interpoloinnin etuna on myös yleiskäyttöisyys, sillä erityisesti tiheällä hilalla se sopii mihin tahansa ongelmaan.

Seuraava vaihe elementtimetodissa on koota ongelmasta yhtälöryhmä. Magneettikentän tapauksessa kunkin elementin sisällä vaaditaan Maxwellin yhtälöiden toteutuminen ja elementtien rajapintoihin asetetaan rajapintaehdot. Lisäksi kunkin elementin materiaalin käytös otetaan huomioon. Maxwellin yhtälöistä voidaan käyttää suoraan niiden differentiaaliyhtälömuotoja tai vaihtoehtoisesti lähestyä yhtälöitä magneettikentän vektoripotentialiesityksen kautta [8]. Määritellyn ongelman ja aiempien vaiheiden perusteella kootaan yksi suuri yhtälöryhmä numeerista ratkomista varten. Yhtälöryhmän numeerista ratkomista varten löytyy paljon erilaisia algoritmeja, usein kuitenkin pyritään minimoimaan ratkaisun virhettä muotoilemalla yhtälön arvon olemaan nolla oikealla ratkai-

sulla. Tämän työn kannalta oleellisinta on tietää hilajaon merkitys ja ymmärtää yleisellä tasolla elementtimetodin toimintaperiaate. Kiinnostunut lukija ohjataan tutustumaan Jinin loistavaan kirjaan aiheesta [8].

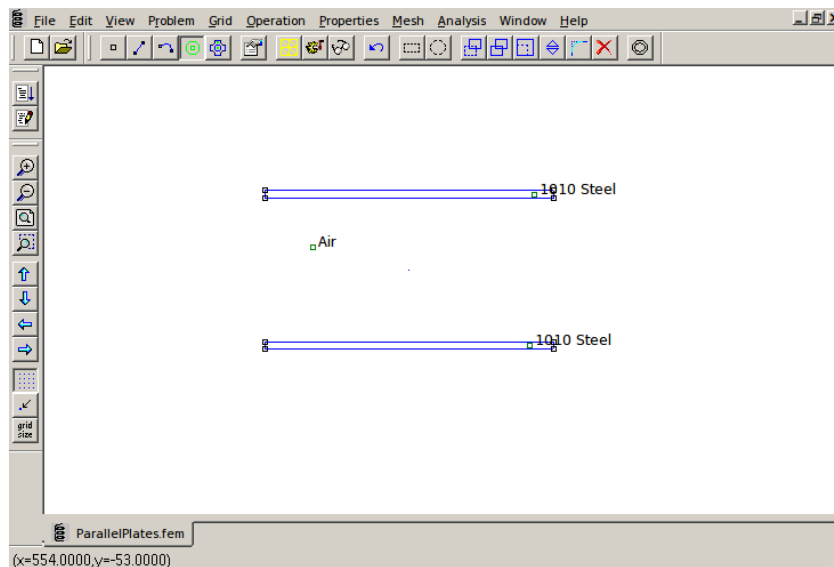
## 2.4.2 Simulaatio-ohjelmistot

Tässä työssä simuloidaan ajasta riippumatonta magneettikenttää sekä kaksi- että kolmiulotteisesti. Kaksiulotteisia simulaatioita tehdään Finite Element Method Magnetics -ohjelmalla eli FEMM:illä, käytettävän ohjelman versio on 4.2. Kolmiulotteiset simulaatiot tehdään COMSOL Multiphysics -ohjelman versiolla 5.0. Molemmat ohjelmat ratkovat simulaatio-ongelmia äärellisten elementtien metodien avulla.

David Meekerin kehittämä FEMM on tehokas graafisella käyttöliittymällä varustettu työkalu magneettikenttien kaksiulotteiseen simulointiin. FEMM:istä on esitettyä ruudunkaappaus kuvassa 9. FEMM on nimensä mukaisesti tehty alunperin magneettikenttien ratkaisemista varten ja se onkin siihen tarkoitukseen loistava työkalu. FEMM:illä on kevyt ratkoa kaksiulotteisia geometrioita ja tässä työssä hyödynnetään FEMM:illä simuloimisen keveyttä keräämällä runsaasti tuloksia automatisoimalla simulaatioita. FEMM:in graafisen käyttöliittymän avulla voidaan piirtää simuloitava geometria ja määrittellä simulaatio-ongelma sekä materiaalit. FEMM sisältää suuren kirjaston valmiita materiaaleja, joka sisältää kaikkien materiaalien B–H-käyrät, jotka tämän työn simulaatioiden tekemiseen tarvitaan. FEMM:iä voi käyttää graafisen käyttöliittymän lisäksi myös automatisoimalla Lua-ohjelmointikielellä tai Matlabilla. Tässä työssä kerätään FEMM:illä paljon simulaatiotuloksia automatisoimalla geometrian ja materiaalien määrittelyprosessi sekä datankeräys.

FEMM ratkoo stationaarisia eli ajasta riippumattomia magneettikenttiä vektoripotentialin avulla. Hyödyntämällä riippumattomuutta ajasta ja rajoittumista kahteen ulottuvuuteen, Maxwellin yhtälöt voidaan tiivistää yhteen helposti ratkottavaan yhtälöön. FEMM ratkoo vektoripotentialia  $\mathbf{A}$ , joka toteuttaa ehdon  $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ . Kaksiulotteisessa tilanteessa tavallisesti kolmiulotteisen vektoripotentialikentän  $\mathbf{A}$  kaksi kolmesta termistä on nolliä, jolloin ongelma redusoituu Poissonin yhtälöksi. [8,9]

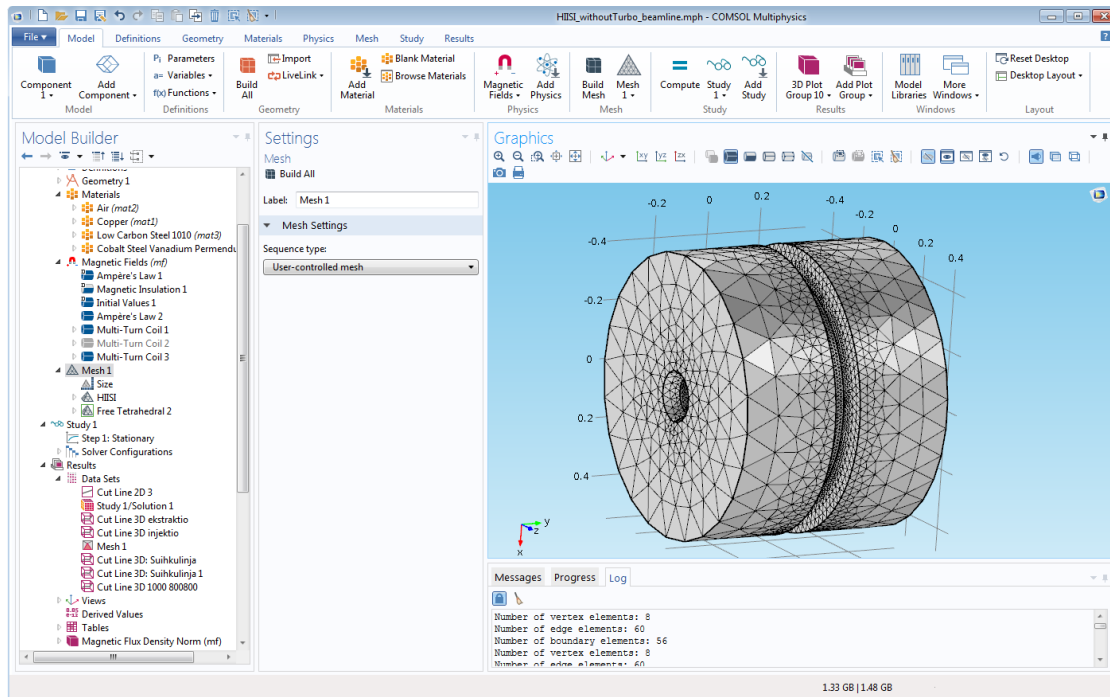
COMSOL Inc.:in COMSOL Multiphysics on tehokas kolmiulotteinen simulaatio-ohjelmisto, jolla voidaan simuloida valtavaa määrää erilaisia fysikaalisia ongelmia kemiallisista reaktioista akustiikkaan ja virtausmekaniikasta sähkömagneettiseen säteilyyn. COMSOL:illa voisi halutessaan tehdä monifysiikkasimulaatioita, kuten sähkövirran kuumentamisen aiheuttamasta lämpölaajenemisesta johtuvia mekaanisia rasituksia. COMSOL:illa voi simuloida magneettikenttiä usealla eri lähestymistavalla. Tämän työn simulaatioissa käytetään vapaana parametrina



Kuva 9: Finite Element Method Magnetics -ohjelman käyttöliittymä.

vektoripotentialia  $\mathbf{A}$  samoin kuin FEMM-simulaatioissa.

COMSOL:in omalla graafisella käyttöliittymällä, josta on ruudunkaappaus esitetynä kuvassa 10, voi luoda simuloitavat kolmiulotteiset geometriat tai vaihtoehtoisesti esimerkiksi CAD-ohjelmilla luotuja kolmiulotteisia malleja voi tuoda COMSOL:iin simuloitavaksi. COMSOL sisältää monipuolisia työkaluja simulaatioprosessin kaikkiin vaiheisiin, mukaan lukien hilan optimoimiseen ja tulosten visualisointiin. COMSOL Multiphysics on suuri kaupallinen ohjelmisto, jolle on kirjoitettu valtavasti erilaisia käyttöohjeita, esimerkiksi [10].



Kuva 10: COMSOL Multiphysics -ohjelman käyttöliittymä.

### 3 HIISIn tyhjiöpumppujen suojaus

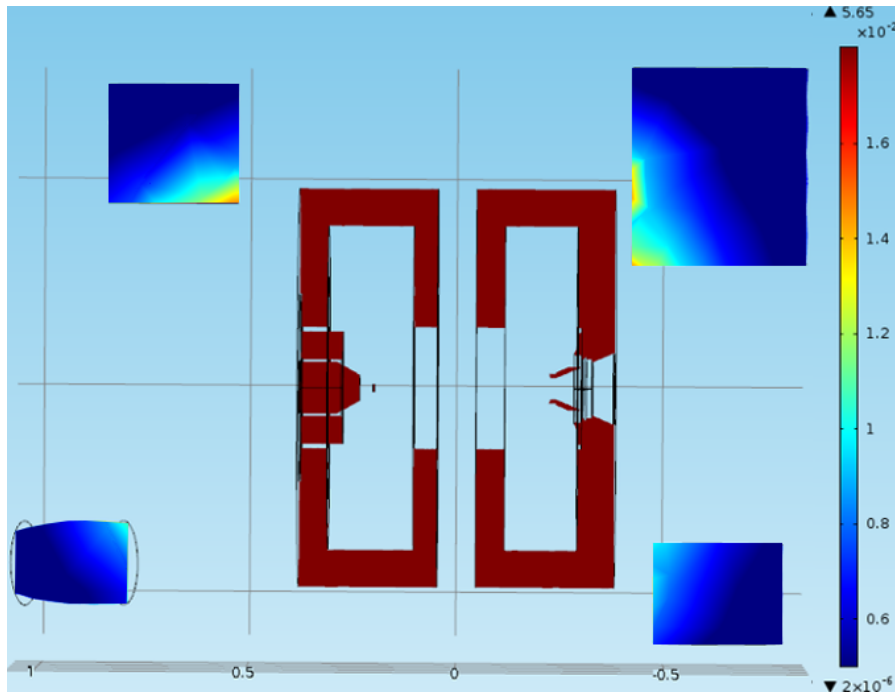
Ionilähteet kuten HIISI vaativat toimiakseen riittävän hyvän tyhjiön, joka luodaan tehokkailla pumpuilla. HIISIn tyhjiöpumput ovat magneettisesti levitoivia turbomolekyylipumppuja. Ulkoinen magneettikenttä aiheuttaa pyörrevirtoja pumpun nopeasti pyöriviin osiin. Pyörrevirrat voivat pahimmillaan ylikuumentaa tyhjiöpumput ulkoisen magneettikentän kasvaessa riittävän suureksi. HIISIn omalla magneettikentällä on siis vaara vaurioittaa sen omia pumppuja. Pumppujen valmistajat ovat ilmoittaneet pumpuille radiaaliset ja aksiaaliset maksimimagneettikentät, joiden vaikutuksien alaisina pumput voivat operoida vaurioitumatta. Tässä luvussa tutkitaan tilanteen vakavuutta ja suunnitellaan tyhjiöpumpuille vaadittavat magneettiset suojaukset.

#### 3.1 Suojattavan magneettikentän kartoitus

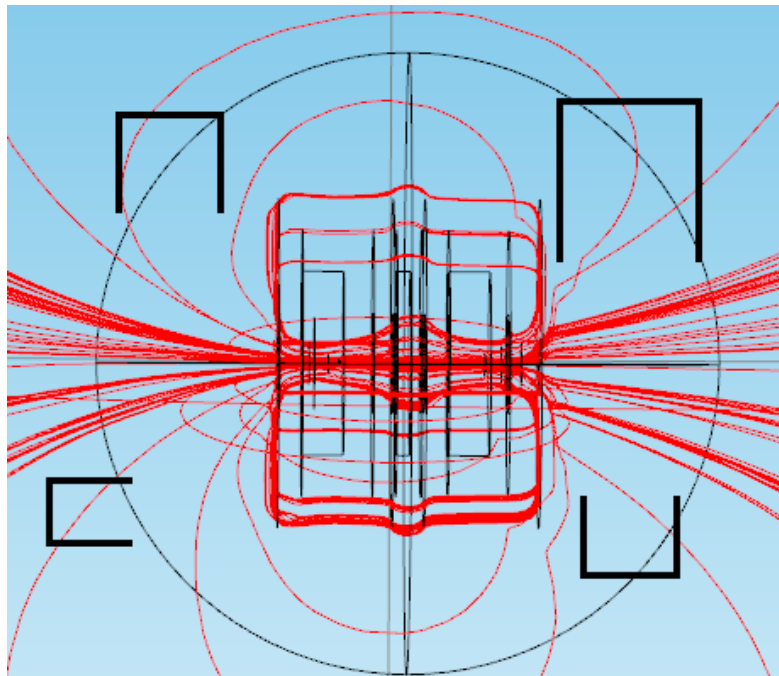
##### 3.1.1 Simulaatiot

Tyhjiöpumppujen suojien suunnittelua varten täytyy tuntea HIISIn hajakentän voimakkuus ja suunta tyhjiöpumppujen kohdilla. Hajakenttää tutkitaan simulaatioilla ja simulaatioiden tarkkuus varmistetaan mittauksilla. Kaksiulotteinen





Kuva 12: HIISIn vuotokentän voimakkuus tyhjiöpumppujen kohdilla. Väriskaala on noin väliltä 5 mT ... 18 mT. Simulaatio on tehty COMSOL:illa.



Kuva 13: HIISIn vuotokentän kenttäviivat tyhjiöpumppujen kohdilla. Suojia on hahmoteltu mustilla ääri viivoilla, ne suojien reunat on jätetty avoimiksi, joita ei voi sulkea. Kenttäviivojen tiheys ei vastaa vuon tiheyttä. Simulaatio on tehty COMSOL:illa.

HIISIn mallille hilaa luodessa täytyy säätää oletusarvoja. Koska simuloidaan suurta systeemiä, joka sisältää myös hyvin pieniä yksityiskohtia, täytyy hilaelementtien minimi- ja maksimikoot asettaa kauas toisistaan. Hilan maksimikoon ollessa liian pieni tulee simulaatiosta tarpeettoman raskas, sillä HIISI ympäröidään suurella pallon muotoisella ilmamassalla, eikä koko ilmatilaa ole tarkoituksenmukaista kartoittaa suurella resoluutiolla. Hilan minimikoon ollessa liian suuri taas voi tulla monenlaisia ongelmia. Koska HIISille tehty malli sisältää hyvin pieniä yksityiskohtia, ei COMSOL liian suurella hilalla saa pahimmassa tapauksessa tuotettua mallille hilaa ollenkaan. Lisäksi joskus COMSOL:in ratkaisija jää jumiin eikä saa minimoitua virhefunktiota. Tätä aiheuttaa pääasiassa hilan heikko laatu. Heikkolaatuisella hilalla tarkoitetaan sitä, että hilaelementteinä käytetyt tetraedrit eivät ole tasasivuisia, vaan eri sivujen välillä on suuri pituusero. Hilan tuottamiseen käytettyjen parametrien ollessa huonot, hilaa tehdessä joudutaan turvautumaan tällaisiin litteisiin elementteihin. Haastavammalliset geometriat voivat aiheuttaa hilaelementeille myös päällekkäisyyksiä, jotka voivat pahimmassa tilanteessa tehdä simulaatiosta mahdottoman ratkaista.

Hilan luomisen hienosäätämistä varten HIISIn malli ympäröidään kahdella pallolla. Sisempi pallo ympäröi HIISiä ja ulompi pallo sisältää koko alueen, jota halutaan tutkia. Sisempi pallo tarvitaan, jotta HIISIn ja sen lähiympäristön hilan luomista voidaan säätää itsenäisesti vaikuttamatta koko ilmamassan hilan tiheyteen. Ulompaan ilmamassaan luodaan huomattavasti harvempi hila simulaation keventämiseksi. Hiloja luodessa on tärkeää, että HIISIn ja sen lähiympäristön hila luodaan ensin, jonka jälkeen luodaan loppuhila. Tällöin loppuhila tehdään sen perusteella, minkälainen hilan reuna luotiin HIISiä ympäröivän pienen pallon kuorelle. Toisin päin hilan luominen aiheuttaisi sen, että pienemmän pallon kuorella hila olisi paljon harvempi, jolloin HIISIn lähiympäristön hilaa jouduttaisiin tihentämään erittäin nopeasti HIISiä lähestyttäessä. Käytännössä tämä aiheuttaisi sen, että HIISIn lähiympäristöön tulisi paljon erittäin huonolaatuisia hilakomponentteja, koska hilaelementtien koko ei voi kasvaa riittävän nopeasti ja äkillistä tihentymistä jouduttaisiin tekemään keinotekoisesti hyödyntäen litteitä elementtejä.

Tuloksia tarkastellaan pääasiassa leikkauskuvina magneettivuon tiheydestä värikarttana, kuten kuvassa 12. Tarkempaa numeerista tarkastelua ei tarvita, sillä simulaation perusteella halutaan hajakentälle suuruusluokka. Magneettikentän kenttäviivojen tarkastelu tehdään virtaviivoilla, kuvan 13 mukaisesti. Mallin kolmiulotteisuuden vuoksi on vuon tiheyden havainnollistaminen kenttäviivojen tiheydellä epäkäytännöllistä, joten kenttäviivoja tutkittaessa tyydytään pelkkään suuntatarkasteluun. Kenttäviivojen tarkasteluun sopisi paremmin kaksiulotteinen vektoripotentiaalitarkastelu, jolloin kenttäviivojen tiheys on helppo saada oikein. Valitettavasti COMSOL:illa ei voi tarkastella kenttäviivoja vain yhdessä tasossa, vaan viivat täytyy aina piirtää kolmiulotteisesti.

HIISIn malli on haastava simuloitava erityisesti kolmiulotteisesti. Kuvissa 12 ja



13 näkyy HIISIn oikealla reunalla epäfysikaalisia artefakteja, jotka mitä luultavimmin aiheutuvat haastavan geometrian aiheuttamasta huonosta hilarakenteesta. Artefakti näkyy kuvassa 12 oikean yläsuojan kohdalla vasemmassa alareunassa "kaksihuippuisena" vuon tiheytenä, kun sen pitäisi pienentyä tasaisesti siirryttäessä kauemmas HIISIn päädyn keskiosasta. Simulaatiomallin haastavuuden aiheuttamat ongelmat voi parhaiten nähdä kuvasta 13 vertailemalla vasemman ja oikean puolen kenttäviivojen käytöstä. Kuvassa näkyy kolmiulotteisesti kenttäviivoja, eikä kenttäviivoja ole eroteltu syvyysuunnassa, joka vaikeuttaa kuvan kenttäviivojen tarkastelua. Todennäköisesti tämän simulaation virhe rajoittuu melko lailla lokaaliksi, eikä tule vaikuttamaan kohtuuttomasti esimerkiksi magneettikenttään ECR2:n suihkulinjalla, useiden metrien päässä HIISIn keloista.

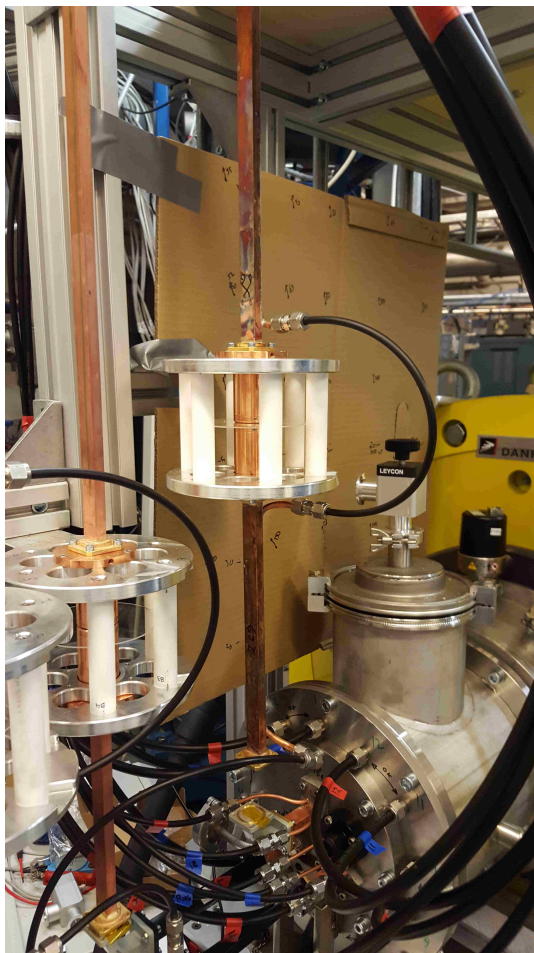
Simulaation artefaktiongelmaa voisi todennäköisesti helpottaa keventämällä HIISIn kolmiulotteista mallia entisestään ja hyödyntämällä pyörähdysymmetrisyyttä laskemisen keventämiseksi ja tarkentamiseksi. Käytettyä simulaatiomallia on jo yksinkertaistettu huomattavasti kaksiulotteisissa simulaatioissa käytettävästä mallista, lähinnä poistamalla alle muutaman millin kokoiset yksityiskohdat. Tätä nimenomaista simulaatiota ei kuitenkaan kannata hioa täydellisyyteen, sillä magneettikentän suuruusluokka ja suunta riittävät. Kaksiulotteisista simulaatioista voi myös vertailla tulosten tarkkuuksia. Pyrimme joka tapauksessa valmistautumaan haastavimpaan tilanteeseen ja simulaatioiden tarkkuuteen keskitytään enemmän itse suojien tehokkuuksia tarkastellessa.

### 3.1.2 Mittaukset

Simulaatioiden todenmukaisuuden varmistamiseksi suoritetaan reaali maailman mittauksia HIISIn ympäristössä samoilla virran arvoilla eli kelojen järjestyksessä injektio-/ekstraktio-/keskikela, virtojen arvoilla 1000 A/ 820 A/ 0 A. Magneettikentän voimakkuutta mitataan Group3:n LPT-141-5S Hallin anturilla, joka on kytketty Group3:n DTM-151-PS teslamittariin. Mittaustulokset merkitään tyhjiöpumppujen tulevien olinpaikkojen kohdille kiinnitettyihin pahveihin kuvan 14 mukaisesti. Pahvit kiinnitettiin mahdollisimman lähelle HIISIn pitkittäin symmetrisesti kahtia leikkaavaa pystytasoa.

Hallin anturi asetetaan pidikkeeseen, joka helpottaa anturin pitämistä  $90^\circ$  kulmassa pahviin nähden ja kutakin mittauspistettä mitatessa käännellään anturia kunnes löydetään suurin vuon tiheyden lukema. Hallin anturi mittaa vuon tiheyttä litteän Hallin kiteen normaalin suunnassa, joten suurimmasta vuon tiheydestä Hallin anturi saadaan näyttämään nollalukemaa kääntämällä sitä  $90^\circ$  sopivasti.

Mittausten ja simulaatioiden vastaavuutta voi tarkastella kuvasta 15. Käyrään on piirretty kuvassa 14a näkyvään pahviin kartoitetuista arvoista ne, jotka ovat

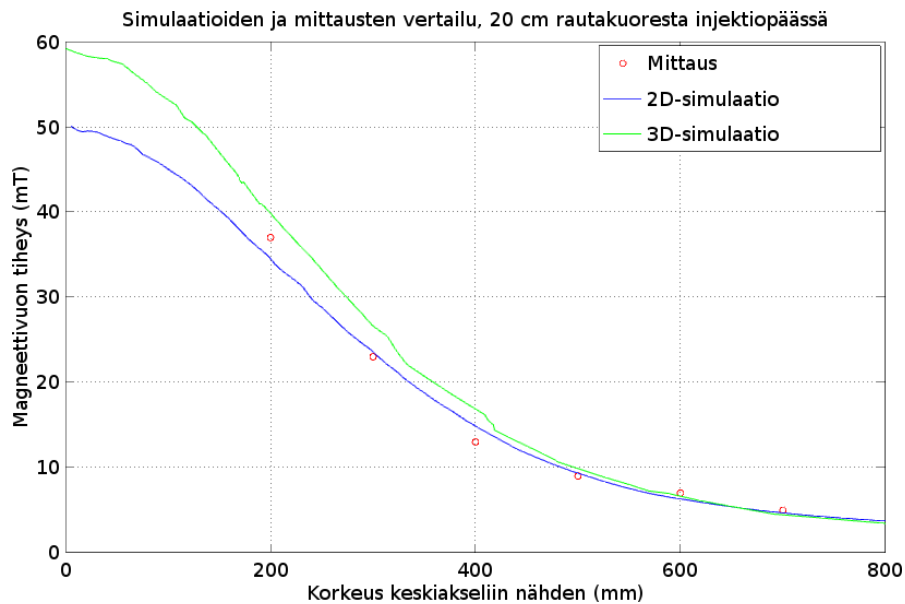


(a) Injektiopään yläosa.



(b) Ekstraktiopää.

Kuva 14: Tyhjiöpumppujen paikoille kiinnitetyt pahvit, joihin kartoitettiin magneettivuon tiheyden arvoja ja suuntia.



Kuva 15: Simulaatioiden ja mittausten vertailu

20 cm:n päässä kuvassa näkyvästä keltaiseksi maalatusta ionilähteen rautakuoresta. Simulaatioiden tulokset on otettu samasta kohdasta. Mittaukset näyttävät seuraavan simulaatioiden tuloksia hyvin. Näillä mittaustuloksilla kaksiulotteinen simulaatio näyttää vastaavan todellista tilannetta hieman paremmin, mutta HIISin keskiakselia, eli kuvaajan vasenta reunaa, lähestyttäessä mittaustulokset näyttävät siirtyvän lähemmäs kolmiulotteisen simulaation tulosta.

Kaikkien simulaatioiden tuloksia vertaillen mittauksiin on hyvä muistaa, että simulaatiot ovat lähes aina huomattavasti yksinkertaistettuja malleja todellisesta. Erityisesti HIISiä ja koko kiihdytinlaboratoriota simuloitaessa joudutaan useita simulaatioihin mahdollisesti vaikuttavia asioita jättämään huomiotta. Kiihdytinlaboratoriossa on paljon laitteistoa ja magneettista materiaalia, jotka saattavat vaikuttaa mitattuun magneettikenttään ja joita ei ole käytännöllistä ottaa simulaatioissa huomioon.

## 3.2 Suojien suunnitelma

### 3.2.1 Suojien muoto ja materiaali

Tyhjiöpumppujen ja erityisesti niitä ympäröivien laitteiden geometriat asettavat huomattavia rajoitteita pumppujen suojien muodoille. Kuvasta 11 voi nähdä, että pumput ovat putkien päissä, joten pumppuja ei voi ympäröidä täysin suojamateriaalilla. Käytännön syistä suojat tulisi myös pystyä poistamaan pumppujen ympäriltä helpokkosti. Lisäksi olisi toivottavaa, että suojat olisi helppo valmistaa.

Päätetään siis tehdä suojista yksinkertaiset pyöreät putket, jotka ovat suljettu toisesta päästä. Näin suojat voidaan helposti asettaa paikoilleen ja poistaa. Yksinkertainen geometria myös helpottaa niiden tutkimista ja valmistamista.

Aiemmin todettiin HIISIn hajakentän olevan suuruusluokaltaan kymmeniä millilitesloja. Tämä on ferromagneettiselle suojalle melko voimakas suojattava magneettikenttä, ja vaikuttaa suojamateriaalin valintaan. Magneettivuon tiheys kasvaa suojamateriaalissa taustakenttää paljon suuremmaksi, sillä suoja toimii keräämällä magneettikentän kenttäviivoja itseensä vähentäen vuon tiheyttä suojattavalla alueella ja sen ympäristössä. Lasketaan karkea arvio sille, paljonko 1 mm:n paksuisesta levystä tehty 20 cm halkaisijaltaan olevan putken magneettivuon täytyy tihentyä, jotta se voi suojata putken pituussuunnassa kulkevalta magneettikentältä. Arvioidaan, että suojamateriaali tulee keräämään kaikki magneettikentän kenttäviivat suojan sisältä ja yhtä suurelta alueelta ympäriltään, eli  $A_{\text{suojattava}} = 2 \cdot \pi r^2$ . Todellisuudessa suojaus ei voi poistaa magneettikenttää kokonaan, mutta se kerää väistämättä paljon vuota itseensä myös ympäriltään, mikä on ei-toivottu sivuvaikutus. Jos putken seinän eli vaipan paksuus on  $d = 1$  mm, täytyy putken seinässä eli suojamateriaalissa magneettivuon tihentyä kertoimella

$$\frac{A_{\text{suojattava}}}{A_{\text{vaippa}}} \approx \frac{2\pi r^2}{2\pi r d} = \frac{r}{d} = \frac{10 \text{ cm}}{1 \text{ mm}} = 100.$$

Tämä on todella karkea arvio ja tähän lukuun vaikuttavat vaipan paksuuden lisäksi myös muun muassa putken pituus ja halkaisija. Siitä voidaan kuitenkin päätellä, että alle 1 T:ssa saturoituvat materiaalit lienevät riittämättömiä tämän työn käyttötarkoitukseen, sillä häiriökenttä voi pahimmillaan lähentyä 30 mT:aa tyhjiöpumppujen ympäristössä, jolloin suojamateriaalissa vuon tiheys olisi  $100 \cdot 30 \text{ mT} = 3 \text{ T}$ . Onneksi hajakenttä heikentyy nopeasti siirryttäessä kauemmas lähteestä, sillä tasaisessa 30 mT:n kentässä saturoituisi jyrkävinkin suoja.

Hinta vaikuttaa myös huomattavasti suojamateriaalin valintaan, sillä suojamateriaalia tarvitaan paljon. Suurimman tyhjiöpumpun suojan halkaisijan tulee olla yli 30 cm ja pituus noin 50 cm. Kalliit  $\mu$ -metallit ovat siis pois laskuista. Ne myös saturoituvat liian helposti. Matalahiilipitoinen rakenneteräs on hyvä valinta tarkoitukseemme, sillä sen saturoitumispiste on korkea, noin 2 T, ja sitä on yleisesti saatavilla. Valitaan materiaaliksi rakenneteräs Fe 37 B.

### 3.2.2 Teräksen paksuus ja kerrosten määrä

Koska suunnitellaan suojia, joiden tehtävänä on pienentää häiritsevää magneettikenttää riittävästi, pyrimme suunnittelemaan suojia varmuusvaralla. Tällöin suojat suojelevat kallista laitteistoa, jos esimerkiksi häiritsevä magneettikenttä kasvaakin joskus odotettua suuremmaksi. Pyritään siis varautumaan pahimpaan tilanteeseen.

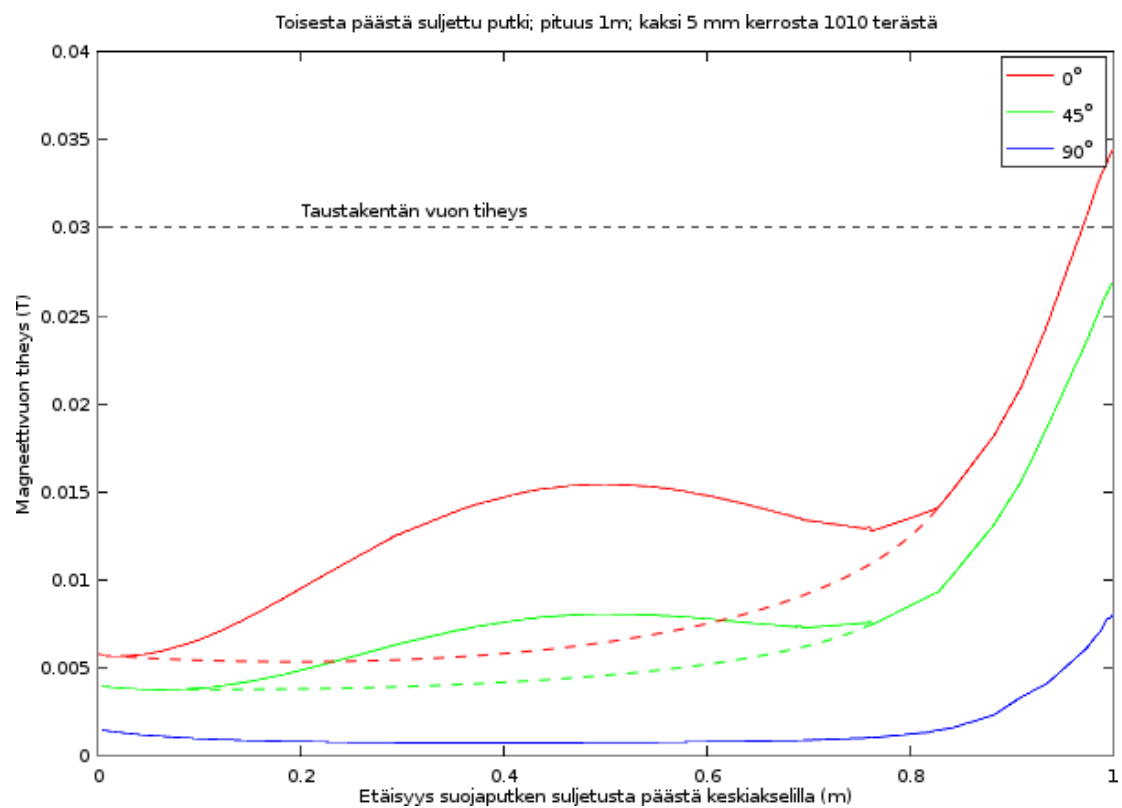
Suoraviivaisin tapa tutkia suoja olisi asettaa halutunlaiset suojat kolmiulotteiseen HIISin simulaatioon ja tutkia koko tilannetta yhtenä kokonaisuutena. Käy kuitenkin ilmi, että peltilevystä tehdyn rakenteen simuloiminen on haastavaa. Peltilevyn ohuus asettaa maksimikorajoitteen hilaelementeille ja koska suoja koostuu kokonaisuudessaan ohuesta pellistä, sen simuloiminen on erittäin raskasta. Ohuen pellin simuloiminen on jopa niin raskasta, että simulaatioihin käytettävien laitteiden käytössä oleva 16 GB RAM-muistia ei riitä simuloitaessa tyhjiöpumpun suojaa, joka koostuu kahdesta kerroksesta 1 mm:n paksuista peltiä. Kun otetaan vielä huomioon se, että HIISin simulaatiomallin laskeminen vie yli vuorokauden ilman peltisuojiakin, on koko tilanteen simuloiminen kerralla epäkäytännöllistä.

Kolmiulotteisia simulaatioita päätetään tehdä aina 5 mm:n pellillä, joka on paksumpaa kuin pelti mitä todennäköisesti tullaan todellisuudessa käyttämään, mutta se keventää simulaatioiden ratkaisuaikojä huomattavasti. Yksittäisen suojan ratkaisemiseen menee siinäkin tapauksessa simulaatioihin käytettävillä laitteilla noin 15–30 minuuttia. Tämän vuoksi päätetään suosia huomattavasti nopeampia kaksiulotteisia simulaatioita, ja turvautua kolmiulotteisiin simulaatioihin ainoastaan tilanteissa, joita ei voida kaksiulotteisesti tutkia.

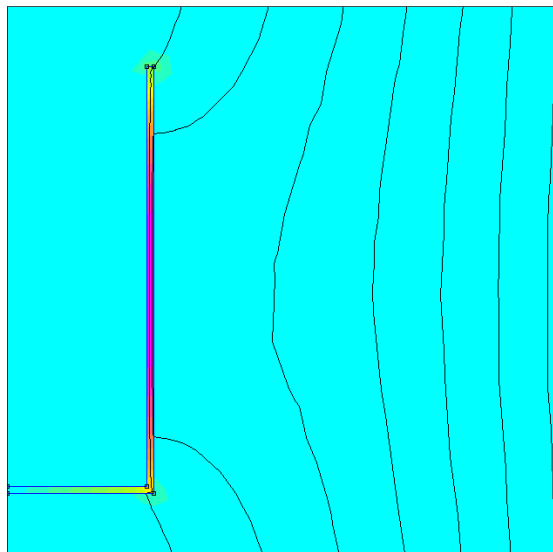
Häiriökentän kartoittamisesta saatiin selville, että kentän suunta vaihtelee tyhjiöpumppujen tulevien suojien suhteen käytännössä pitkittäisistä poikittaiseksi. Ensimmäiseksi täytyy selvittää, minkä suuntaiselta magneettikentältä valitunlainen suoja suoja heikoiten. Tämän jälkeen voidaan tutkia ainoastaan haastavinta tilannetta ja olla luottavaisia siihen, että valittu suoja toimii joka tilanteessa.

Kuvassa 16 on esitettyä suojaustehokkuudet suojan keskiakselilla suljetusta päästä lähtien, suojan ollessa ulkoiseen 30 mT magneettikenttään nähden pitkittäin, poikittain ja siltä väliltä. Huomataan, että suojan tehokkuus on huonoin pitkittäin olevan häiriömagneettikentän suhteen, ja putken suulla magneettikenttä jopa voimistuu. Putkimainen suoja suoja parhaiten poikittaiselta magneettikentältä ja heikoiten pitkittäiseltä. Suojaustehokkuus muilla kulmilla parantuu käännettäessä suoja lähemmäs poikittaista kenttää ja heikentyy käännettäessä suoja lähemmäs pitkittäistä kenttää. Pitkittäin ja vinottain tämän kyseisen suojan keskiakselin vuon tiheydessä on havaittavissa pieni ”kumpu”, joka eroaa poikittaisen tilanteen käyrän muodosta. Tarkempi tarkastelu osoittaa, että pitkittäin ja vinottain tämä kyseinen suoja saturoituu, eli jossain kohtaa suojamateriaalia magneettikenttä lähenee saturoitumisrajaa. Kuvasta 17 voi nähdä, miten pitkittäisessä tapauksessa suojamateriaalissa magneettivuo on tiheimmillään pituussuunnassa keskellä. Huomataan myös, että suojan pidentäminen tekee siitä herkemman saturoitumiselle.

Kaksiulotteisilla FEMM-simulaatioilla tutkitaan kvalitatiivisesti kerrosten määrän ja kerrosten paksuuden vaikutusta putkimaisen suojan suojaustehokkuuteen. Pitkittäisen kentän tapauksessa voidaan tarkastella äärellisen pituista suoja,



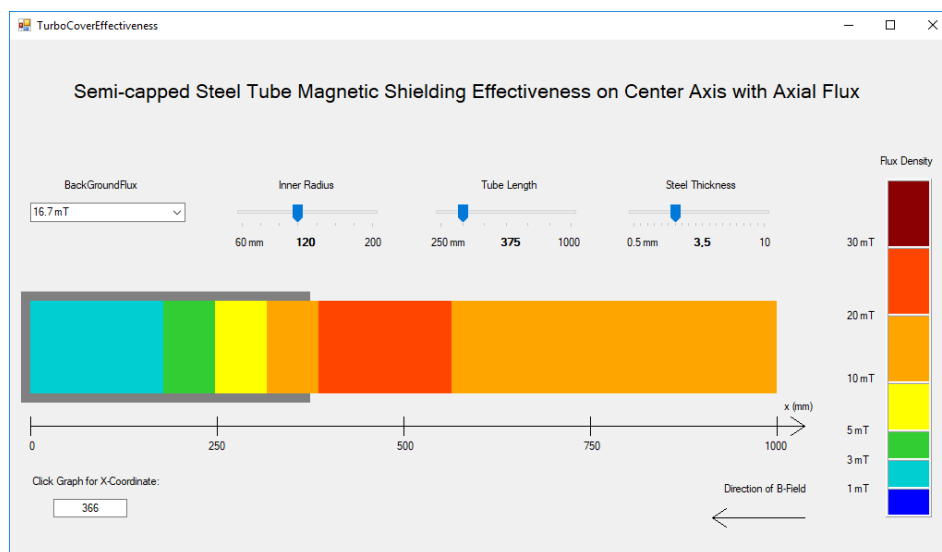
Kuva 16: Häiritsevän magneettikentän suunnan vaikutus toisesta päästä suljetun putkimaisen suojan tehokkuuteen. Kulman arvo  $0^\circ$  tarkoittaa pitkittäistä kenttää. Katkoviivoilla on hahmoteltu käytöstä saturoitumattomalle, vastaavalle suojalle.



*Kuva 17:* Suojamateriaali kerää kenttäviivoja ja värityksen perusteella nähdään, miten suojamateriaalissa magneettikenttä on voimakkaimmillaan puolella välissä sylinterin vaippaa. Geometria on pyörähdyssymmetrinen vasemman laidan suhteen. Homogeeninen magneettikenttä on luotu pitkällä solenoidilla. Ruudunkaappaus FEMM:istä.

hyödyntämällä pyörähdyssymmetrisyyttä, kuten kuvassa 17. Poikittaisen kentän tilannetta joudutaan tutkimaan äärettömän pitkän putkisuojan avulla. Poikittaiselta kentältä suojautuessa eristeellä eroteltujen teräskerrosten lisääminen parantaa suojaustehokkuutta paremmin kuin kerrosten paksuntaminen samalla määrällä terästä. Pitkittäisen kentän tapauksessa kerrosten lisääminen ei kuitenkaan lisää suojan tehokkuutta enempää kuin alkuperäisen kerroksen paksuntaminen samalla määrällä materiaalia. Tyhjiöpumppuja täytyy suojata myös pitkittäiseltä kentältä, joten kerroksia ei kannata tehdä enempää kuin yksi, sillä suojilla halutaan varautua haastavimpaan tilanteeseen ja putkimainen suoja suoja tehoaammin poikittaiselta kentältä joka tapauksessa. Yksikerroksinen suoja on lisäksi monikerroksista kestävämpi ja helpompi valmistaa.

Teräksen saturoituminen tulee ottaa huomioon ja varmistaa, etteivät häiriökentät joilta pyrimme suojaamaan kykene saturoimaan suoja. Simulaatioista todetaan suojien olevan hyvin vastustuskykyisiä saturoitumiselle poikittaiselta magneettikentältä. Sen sijaan pitkittäinen kenttä saturoi suojan terästä huomattavasti helpommin. Pitempi putki saturoituu pitkittäisessä kentässä lyhyttä helpommin johtuen siitä, että suojamateriaalin sisäinen kenttä voi kasvaa tällöin voimakkaammaksi suojan keskiosassa, kuten kuvasta 17 voi nähdä. Ilmiö on sama kuin luvussa 2.2.3 käsitelty sähkömagneetin luoman vuon voimistaminen. Mitä suurempi osa yksittäisen kenttäviivan määrittelemästä suljetusta silmukasta kulkee korkean permeabiliteetin omaavassa materiaalissa, sitä suurempia magneettivoita kenttäviivalla voidaan saavuttaa.



*Kuva 18:* Graafinen käyttöliittymä puoliavonaisen putken suojaustehokkuuden tarkastelua varten. Suojan ominaisuuksia voi säätää yläosassa olevista liukusäätimistä ja taustakentän voimakkuutta pudotusvalikosta. Simulaatiodataa on kerätty putken keskiakselilta kaksikulotteisesta pyörähdyssymmetrisestä simulaatiosta.

Tyhjiöpumppujen suojausongelman monimutkaisuuden vuoksi päätetään analyttisen tarkastelun lisäksi kerätä 2D-simulaatioista riittävästi tuloksia valitulle suojatyypille, jonka perusteella voidaan tehdä lopulliset valinnat suojien dimensioille. Automatisoidaan FEMM Lua-ohjelmointikielellä keräämään dataa magneettivuon tiheydestä putken keskiakselilla eri putken pituuksilla, paksuuksilla ja säteillä sekä muutamalla eri taustakentän voimakkuudella. Tämän jälkeen tehdään yksinkertainen graafinen käyttöliittymä C#-ohjelmointikielellä ja Windows Forms -työkaluilla, jonka avulla kerätyn simulaatiodatan tarkastelu on helppoa. Lopullisesta ohjelmasta on esitetty ruudunkaappaus kuvassa 18. Simulaatioiden nopeuttamiseksi ei simulaatioista kartoiteta magneettivuon tiheyttä kaikkialta, vaan vuon tiheyksiä kerätään ainoastaan suojan keskiakselilta tasaisin välein.

Ohjelman avulla voidaan helposti tarkastella kunkin tyhjiöpumpun tehokkuutta eri parametreilla ja valita sopivanlaiset suojat kussakin tilanteessa. Valitaan ohjelmasta suojakohtaisesti suojattavan magneettivuon tiheydeksi hieman liioiteltu arvo. Lisäksi suojattava magneettikenttä ei todellisuudessa ole homogeeninen, vaan heikkenee siirryttäessä kauemmas HIISistä, mikä lisää simulaatiotuloksien varmuusvaraa entisestään. Tällöin voidaan valita suojille parametrit, joilla suojat ovat simulaatiotulosten mukaan riittävän tehokkaat vaimentamaan häiritsevän magneettikentän valmistajan ilmoittamien vuontiheysrajoitusten alapuolelle ja luottaa siihen, että todellisessa tilanteessa valitut suojat ovat myös riittäviä.

Tyhjiöpumput kestävät valmistajan mukaan huonommin radiaalista eli poikit-



taista magneettikenttää, jolle kaikkien pumppujen kesto on noin 5 mT. Aksiaalista eli pitkittäistä magneettivuota pumput kestävät hieman paremmin, osa kestää 10 mT ja osa 15 mT. Päätetään valita kaikille pumpuille suojat, jotka pitävät pitkittäiset magneettivuot alle 10 mT:ssa turbiinien lähetyvillä. Luotetaan siihen, että suojista läpi vuotava poikittainen magneettikenttä ei näissä tilanteissa ylitä 5 mT:aa, sillä simulaatioiden perusteella suojat ovat tehokkaampia poikittaisessa magneettikentässä ja voimakkaimmat kentät pumppujen kohdilla ovat pitkittäisiä. Suojien koot valitaan kunkin pumpun vaatimusten mukaan, ja kaikkien suojien teräksien paksuuksiksi valitaan 3 mm.

## 4 ECR2:n suihkulinjan suojaus

Tässä luvussa tutkitaan häiritsevän magneettikentän vaikutusta ECR2:n suihkulinjaan ja pyritään suunnittelemaan magneettiset suojat, jotka suojaavat ionisuihkua riittävästi HIISIn vaikutukselta. Ensin tutkitaan HIISIn hajakentän suuntaa ja voimakkuutta ECR2:n injektioelinjan kohdalla ja ionisuihkun herkkyyttä häiritsevälle magneettikentälle. Näiden tietojen perusteella voidaan muodostaa vaatimukset suojan hyvyydelle ja suunnitella magneettinen suojaus ECR2:n suihkulinjalle.

### 4.1 Suojattavan magneettikentän kartoitus

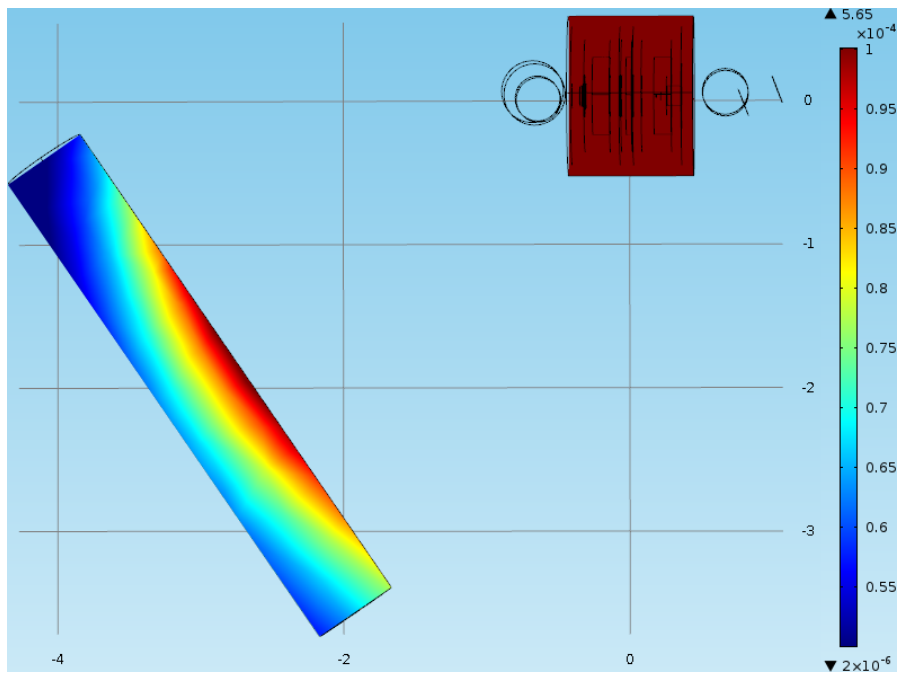
Tässä luvussa tutkitaan HIISIn magneettikenttää ECR2:n suihkulinjan kohdalla.

#### 4.1.1 Simulaatiot

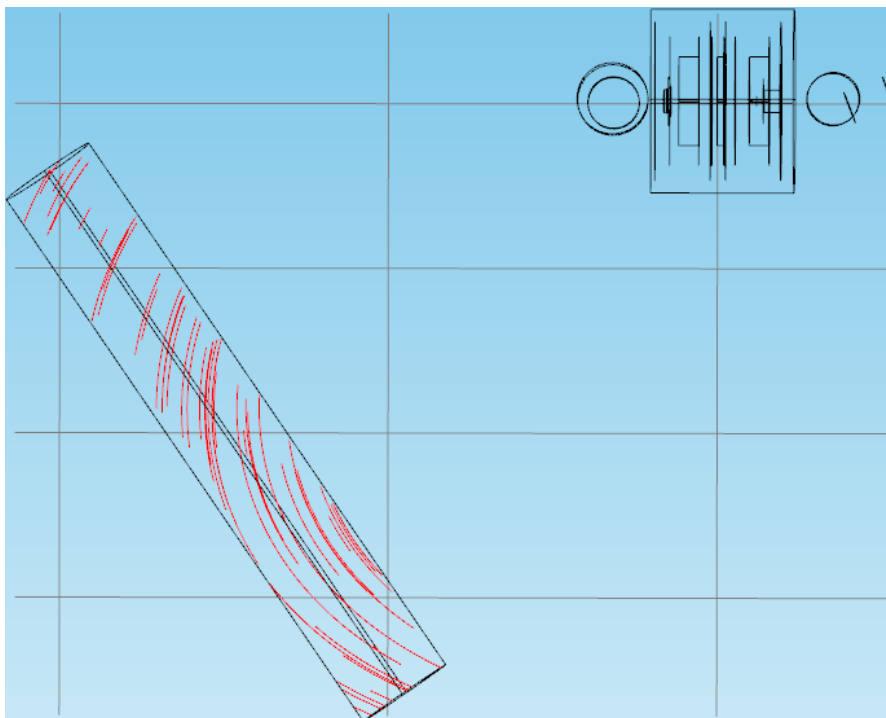
HIISIn hajakentän suuruuden ja suunnan kartoittamiseksi ECR2:n suihkulinjalla voidaan käyttää luvussa 3.1.1 tehtyjen simulaatioiden tuloksia. Kyseistä simulaatiota tehdessä varmistettiin, että HIISiä ympäröivä ilmassa on riittävän suuri, jotta simulaatiotilavuus sisältää myös ECR2:n suihkulinjasta suojauksen kannalta kiinnostavan osan. Tällöin ei raskasta simulaatiota tarvitse tehdä uudestaan.

Kaksiulotteisen ja kolmiulotteisen simulaation magneettivuon tiheydet suihkulinjan keskellä on esitetty kuvassa 21. Simulaatiotulokset on otettu samasta kohdasta eli kuvissa 19 ja 20 vasemmalla näkyvän lieriön keskiakselilta, alkaen vasemmalta ylhäältä ja päättyen oikealle alas. Magneettivuo pysyy simulaatiotulosten perusteella suihkulinjalla alle  $100 \mu\text{T}$ :n ja sen suunta vaihtelee suihkulinjan suuntaisesta lähes sitä vastaan kohtisuoraksi. Magneettikentän suihkulinjaa kohtisuorassa olevien komponenttien vuon tiheydet on piirretty katkoviivoilla.

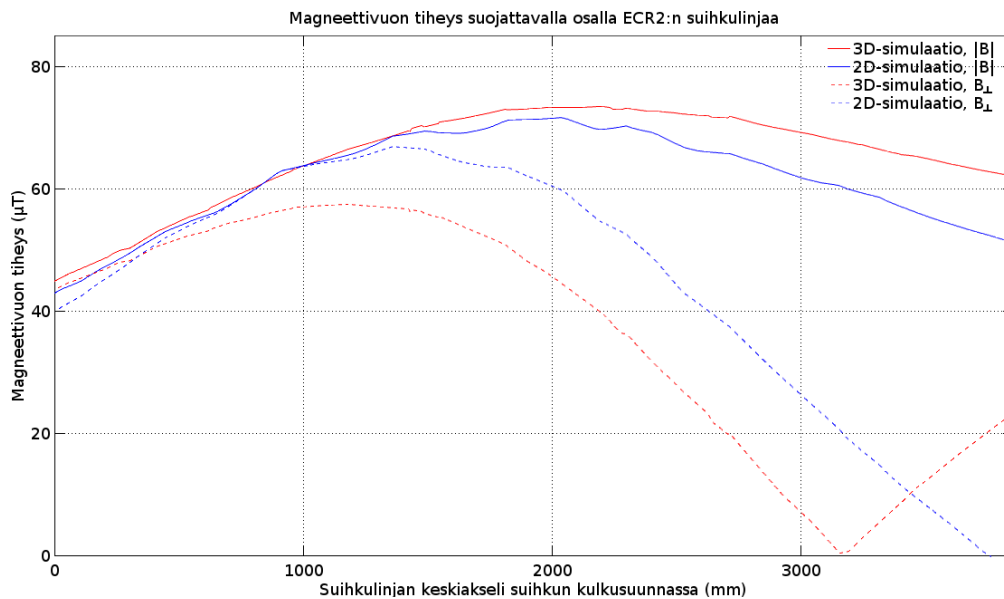
Lorentzin voiman (8) mukaan magneettivuo ei vaikuta sen kenttäviivojen suuntaisesti kulkeviin varattuihin hiukkasiin. Tämän vuoksi suihkulinjaa suojaessa ei tarvitse välittää HIISIn hajakentän suihkulinjan suuntaisista komponenteista, sillä suihkulinjalla kulkevien hiukkasten voidaan olettaa kulkevan suoraan suihkulinjaa pitkin. Valitaan HIISIn hajakenttäsimoilaatioiden perusteella suojien simulaatioihin poikittainen magneettikenttä, jonka vuontiheys on  $100 \mu\text{T}$ . Tällöin suojat, jotka riittävät suojien tehokkuussimoilaatioiden perusteella, ovat varmasti riittävän tehokkaita.



Kuva 19: HIISin vuotokenttä ECR2:n ionisuihkulinjan kohdalla. Värikartta on väliltä  $50\mu\text{T} \dots 100\mu\text{T}$ . Kolmiulotteinen simulaatio on tehty COMSOL:illa



Kuva 20: HIISin vuotokentän kenttäviivat ECR2:n ionisuihkulinjan kohdalla. Kolmiulotteinen simulaatio on tehty COMSOL:illa



*Kuva 21:* Magneettivuon tiheys ECR2:n suihkulinjalla simulaatioiden mukaan. Tuloksia on kerätty noin 4 m matkalta suihkulinjan siitä osasta, jota pyritään suojaamaan. Kaksiulotteiset simulaatiot on tehty FEMM:illä ja kolmiulotteiset COMSOL:illa.

## 4.2 Magneettikentän vaikutus ionisuihkuun

Tässä luvussa tutkitaan ionisuihkun herkkyttä häiriömagneettikentälle eli sitä, miten magneettikenttä vaikuttaa ionisuihkun intensiteettiin suihkulinjan lopussa. Tehdään ionioptiikkasimulaatioita, joihin on lisätty yksinkertainen magneettikentän vaikutuselementti ja tehdään myös mittauksia paikan päällä. Saatujen tulosten perusteella voidaan valita suunnittelemista varten suojalle kriteerit, joiden perusteella suoja on riittävän hyvä.

### 4.2.1 Ionisuihkun simulointi

Ionisuihkuja tutkitaan ionioptiikkasimulaatiokirjastolla, joka on tehty kiihdyttimeen injektioinjektin mallintamiseen. Simulaatio toimii lineaarisen matriisiapproksimaation perusteella ja kutakin ionisuihkuja fokusoivaa elementtiä kuvataan omalla matriisiesityksellään. Lineaarisen approksimaation ansiosta koko siirtolinjan vaikutus suihkuun on yksi matriisi, joka muodostetaan kertomalla kaikkien suihkulinjan ionioptiikkaelementtien matriisit keskenään. Magneettikentän vaikutuksen simuloimista varten on simulaatiokirjastoon lisätty yksinkertainen kääntöelementti, jolla voidaan kääntää ionisuihku diskreetisti halutun kulman verran, halutussa kohdassa.

HIISIn hajakentän vaikutuksen simuloimista varten oletetaan, että magneetikenttä on homogeeninen ja täysin vaakasuorassa koko vaikutusalueellaan, sekä kohtisuorassa ionisuihkulinjaan nähden. Tällöin magneetikenttä aiheuttaa vaakasuuntaan kulkevaan hiukkaseen pystysuuntaisen voiman. Ionisuihkun kaikkien hiukkasten oletetaan kulkevan lähes vaakasuuntaan, ja magneetikentän vaikutusta simuloidaan kääntämällä kaikkia hiukkasia saman verran. Jokaista yksittäistä hiukkasta käännetään samalla kulmalla, ja kulma lasketaan vaakasuuntaan kulkevalle hiukkaselle. Kääntökulma  $\theta$  saadaan yhtälöstä

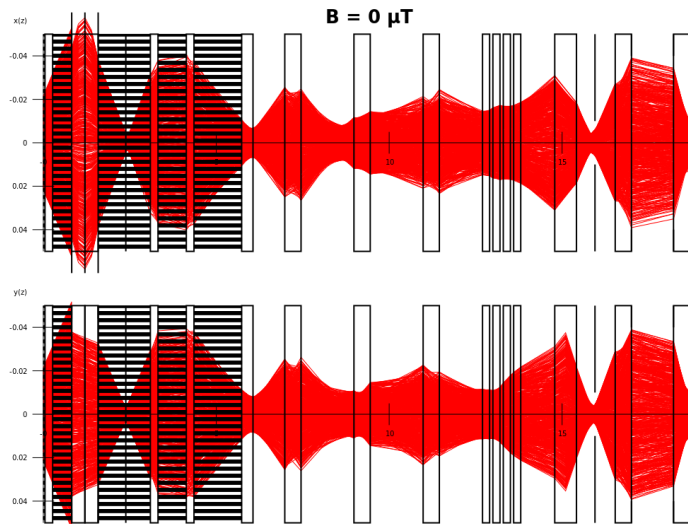
$$\frac{\theta}{L} = B \sqrt{\frac{q}{2mV_0}}, \quad (15)$$

missä  $L$  on hiukkasen kulkema matka,  $B$  on suihkua kääntävän magneettivuon tiheys,  $q$  on hiukkasen varaus,  $m$  on hiukkasen massa ja  $V_0$  on ionisuihkun kiihdytysjännite. Kulma esitetään suhteena kuljetusta matkasta, sillä tasaista hiukkasia kääntävää voimaa simuloidaan tekemällä pieniä diskreettejä käännöksiä tasaisin välimatkoin. Tällöin kullakin pienellä matkalla vaadittu kääntökulma saadaan kertomalla kyseisellä matkalla etukäteen laskettua kulma–matka-suhdetta.

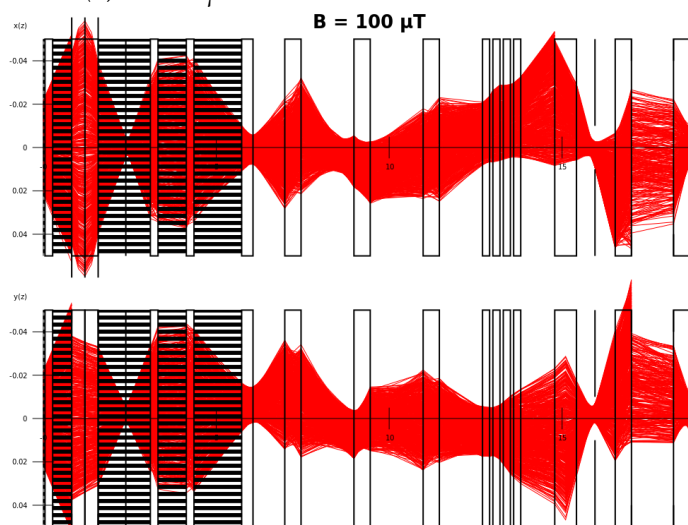
Ionioptiikkasimulaatioiden tuloksia havainnollistetaan yksinkertaisella grafiikalla kuvan 22 mukaisesti. Ionisuihkun jokaiselle simuloidulle hiukkaselle on piirretty sen kulkema rata ohuella punaisella viivalla. Valo-optiikkaa vastaavasti ionisuihku leviää ionisuihkulinjaa pitkin kulkiessaan vasemmalta oikealle, kunnes sitä fokusoidaan linssiä vastaavilla ionioptisilla elementeillä, jotka pyrkivät pitämään ionisuihku kasassa. Ylöspäin kulkeva yksittäinen simuloitu ioni käännetään fokusoitaessa kulkemaan alaspäin ja alaspäin kulkeva ioni käännetään ylöspäin. Kuviin on piirretty päällekkäin ionisuihkun käytös vaakasuunnassa ( $x$ ) ja pystysuunnassa ( $y$ ), molemmissa vaakasuuntainen akseli on  $z$ -akseli eli suihkulinjan pituussuunta.

Verrattaessa kuvia 22a ja 22b voi nähdä selkeästi, miten magneetikentän kääntävä vaikutus saa symmetriseksi optimoidun ionisuihkun pois radaltaan. Suihkulinjan ionioptiikka on tarkasti suunniteltu pitämään ionisuihku mahdollisimman hyvin kasassa ja kuten simulaation grafiikoista nähdään, ionisuihkun hallinta vaatii jatkuvaa uudelleen fokusoimista. Pienikin häiriö ionisuihkun alkupäässä kääntää suihkun reunalla kulkevia hiukkasia riittävästi, jotta ne törmäävät suihkulinjan seinään tai kollimaattoreihin.

Simulaatioissa käytettävät suihkun alkuehdot on saatu ekstraktiosimulaatiosta, joka on tehty Ion Beam Simulator -simulaatiopakettilla [11]. Simulaatiossa ionisuihku luodaan satunnaislukugeneraattorin ja alkuehtojen avulla antaen kullekin ionille satunnainen poikittainen nopeus. Tällainen suihkusiemenen eli satunnaisiin suuntiin kulkevien ionien käyttö varmistaa sen, että suuresta joukosta simuloituja ioneja saadaan luotettavaa tilastotietoa. Kuvassa 23 on esitetty

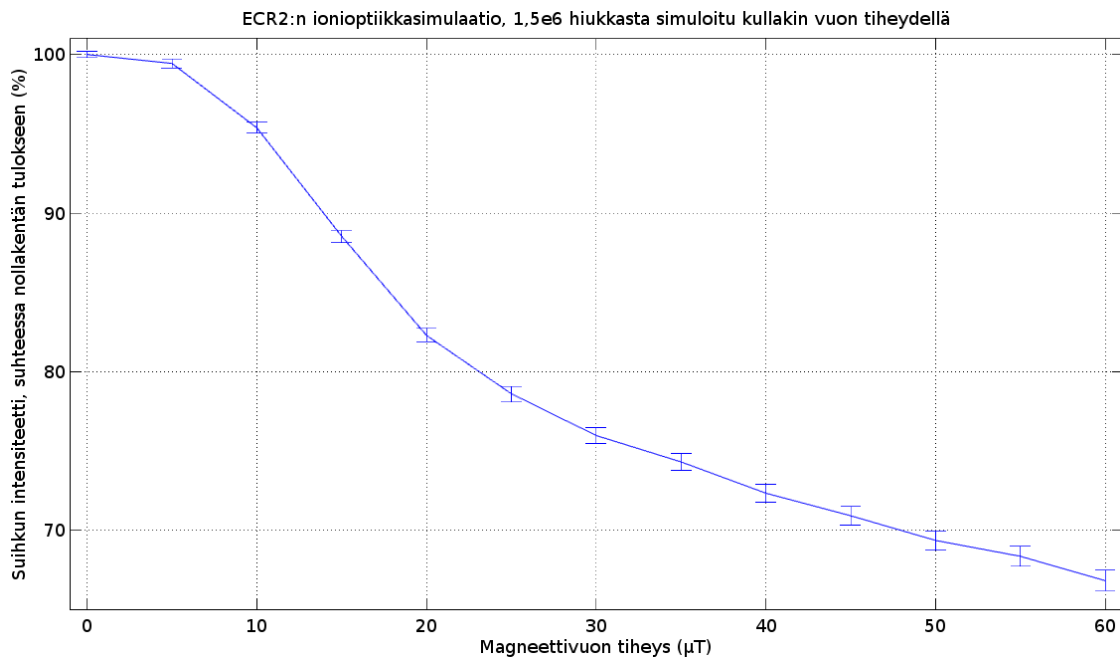


(a) Eräs  $0 \mu\text{T}$ :n taustakentän simulaatiotulos.



(b) Eräs  $100 \mu\text{T}$ :n taustakentän simulaatiotulos.

*Kuva 22:* ECR2:n ionioptiikkasimulaatioista piirrettyä grafiikkaa. Yksittäisten ionien kulkureitti on piirretty punaisilla viivoilla, kuvissa on erikseen hiukkasten kulkureitit vaakasuunnassa (päällä) ja pystysuunnassa (alla). Pystysuorat mustareunaiset laatikot kuvaavat ionioptisia elementtejä kuten solenoideja ja heksapoleja. Kollimaattoreita on kuvattu pystysuorilla mustilla viivoilla, joissa on viivassa aukko kuvaamassa kollimaattorin rajoja. Vasemmalla puolella suihkun alkupäässä on magneettikentän vaikutusalue merkitty puolipeittävällä mustalla säleiköllä.



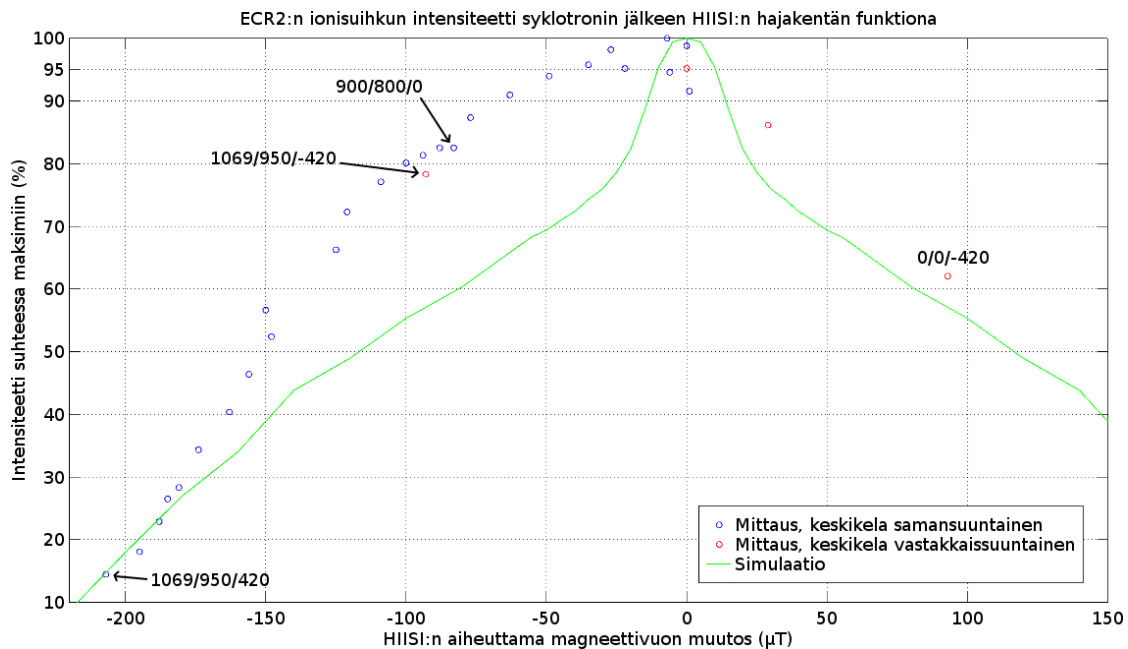
*Kuva 23:* ECR2:n herkkyys magneettikentän häiriölle ionioptiikkasimulaation mukaan. Dataa on kerätty  $1,5$  miljoonalla hiukkasella kutakin mittauspistettä kohti.

käyrä simuloidun ionisuihkun läpäisyprosentista suhteessa nollakentän läpäisyprosenttiin ionisuihkua kääntävän magneettikentän arvoille  $0 \mu\text{T}$ :sta  $60 \mu\text{T}$ :aan  $5 \mu\text{T}$ :n välein. Kutakin mittauspistettä varten simuloitiin  $1,5$  miljoonaa hiukkasta.

#### 4.2.2 Mittaukset

HIISIn magneettikentän vaikutusta ECR2:n ionisuihkun intensiteettiin tutkittiin muuttamalla HIISIn kelojen virtojen arvoja ja mittaamalla HIISIn magneettikentän voimakkuutta sekä syklotronin jälkeisen Faradayn kupin virtaa. HIISIn aiheuttaman magneettivuon tiheyttä mitattiin ECR2:n ionisuihkulinjalla SOL2:n ja SOL3:n välissä olevan diagnostiikkakammion päältä. Syklotronin jälkeisen Faradayn kupin virta kuvaa ionisuihkun intensiteettiä, sillä syklotronin läpäisseet ionit törmäävät Faradayn kuppiin ja aiheuttavat mitattavan sähkövirran, jonka suuruus riippuu kuppiin törmäävien ionien lukumäärästä ja varausasteesta.

Ulommaisten kelojen virtojen arvoja muutettiin aina yhtä aikaa, ja keskikelan virtaa muutettiin itsenäisesti. Injektiio- ja ekstraktiokelan virtojen suhteita niiden maksimivirtoihin pidettiin keskenään samoina, injektiokelan maksimivirran ollessa  $1125 \text{ A}$  ja ekstraktiokelan  $1000 \text{ A}$ . Esimerkkinä eräs käytetty virtojen arvo ulkokeloille oli  $80 \%$ , jolloin injektiokelassa kulki  $900 \text{ A}$  ja ekstraktiokelassa  $800 \text{ A}$ . Suuri osa mittauksista tehtiin keskikelan virran kulkiessa eri suuntaan kuin sen



Kuva 24: HIISin vuotokentän vaikutus ECR2:n ionisuihkun intensiteettiin. Kuvaan merkityt lukukolmikot ovat HIISin kolmen kelan virtojen arvoja ampeereina muodossa Injektio-/Ekstraktio-/Keskikela.

nominaalivirta. Tällöin keskikelan ja ulkokelojen aiheuttamat magneettikentät kulkevat samaan suuntaan ja vahvistavat toisiaan. Nominaaliarvoilla keskikelan aiheuttama magneettikenttä vaikuttaa ulkokelojen luomaan magneettikenttään destruktiivisesti ja vähentää HIISin hajakentän arvoa ECR2:n suihkulinjalla.

Kuvassa 24 on esitetty mittausten ja simulaatioiden käytös samassa kuvaajassa. Sekä mittausten että simulaatioiden mittauspisteet on normalisoitu prosenteiksi suurimmasta ionisuihkun intensiteetin arvosta. Sekä simulaatiot että mittaukset tehtiin 14 kV:n kiihdytysjännitteellä suihkun koostuessa  $^{15}\text{N}^{4+}$ -ioneista. Vaikka simulaatio- ja mittaustulokset näyttävät ensinäkemältä eroavan toisistaan huomattavasti, täytyy kuitenkin muistaa, että ionisuihkun intensiteetti riippuu suuresta määrästä parametreja ja ionisuihku on erilainen jokaisena hetkenä. Toisena päivänä tehdyt tismalleen samat mittaukset voisivat vastata simulaatioita täydellisesti. Jopa tehtyjen mittausten aikana ionisuihkun intensiteetti vaihteli, jonka voi nähdä esimerkiksi nollakentällä saaduista monesta eri mittauspisteestä.

Simulaatioiden mukaan ionisuihku on hieman herkempi ulkoiselle magneettikentälle kuin mitä mittauksista voisi päätellä. Ero voidaan kuitenkin perustella. Ionioptiikkasimulaatioissa magneettivuon tiheys on vakio ja täysin kohtisuorassa suihkulinjaa kohtaan koko arvioidulla magneettivuon vaikutusalueella. Todellisuudessa HIISin aiheuttama magneettivuo ei ole suihkulinjaa vastaan kohtisuorassa juuri missään ja sen tiheys vaihtelee. Mittauksissa Hallin kide oli kiinnitettyinä paikoilleen SOL2:n ja SOL3:n välisen diagnostiikkakammion päälle.



Vastaava kohta kuvan 21 vaaka-akselilla on noin 1,8 m. HIISIn hajakentän simulaatioiden mukaan siis mittauksista saadut magneettivuon tiheydet ovat hyvin lähellä maksimivuota suihkulinjalla. Tämä korostaa entisestään simulaatioiden ja mittausten eroa, sillä kuvan 24 magneettivuon arvot tarkoittavat mittauksille lähes lokaalia maksimia, kun taas simulaatioissa vastaava kenttä on kaikkialla sama. Jos mittauksissa olisi sen sijaan kerätty keskiarvoisen vuon tiheyden arvoja, olisivat simulaatiot ja mittaukset tässä tilanteessa lähempänä toisiaan.

### 4.2.3 Suojauskriteerien valinta

HIISIn heikentävä vaikutus ECR2:n ionisuihkun intensiteettiin haluttaisiin tietenkin eliminoida kokonaan, mutta se ei ole käytännössä mahdollista. Ennen suojan suunnittelua täytyy siis valita toleranssi ionisuihkun heikentymiselle ja valita suojan tehokkuusvaatimus sen perusteella. Päätetään pyrkiä pitämään ionisuihkun intensiteetti vähintään noin 95 %:ssa maksimista, kuitenkin pyrkien parhaaseen mahdolliseen suojaukseen käytännöllisyyden rajoissa.

Ionioptiikkasimulaatioiden mukaan häiritsevän kentän vuon tiheys saa olla suurimmillaan noin  $10 \mu\text{T}$  kuvan 23 käyrän perusteella, kun taas kuvan 24 mittausdatan perusteella hajakentän suuruus saisi olla jopa  $25 \mu\text{T}$ . Simulaatiot antavat kuitenkin todennäköisesti todellisuutta haastavamman kuvan magneettikentän vaikutuksesta, joten todellinen toleranssi lienee  $10 \mu\text{T}$ :n ja  $25 \mu\text{T}$ :n välillä.

Valitaan laatuvaatimukseksi suojille, että häiritsevän magneettikentän vuon tiheys ei saa ylittää suojauksen jälkeen  $15 \mu\text{T}$ :a. Suojattavaksi kentäksi valittiin simulaatioiden perusteella  $100 \mu\text{T}$ . Kuvaan 24 on merkitty muutama tärkeimmistä mitattujen magneettivuon tiheyksien luoneista virtakonfiguraatioista. Aiemmin todettiin, että mitatut magneettivuot ovat todennäköisesti lähellä suurinta vuon tiheyden arvoa suihkulinjalla. Mittaustulokset tukevat siis väitettä, että todennäköisesti HIISIn hajakenttä ei normaalissa käytössä ylitä  $100 \mu\text{T}$ :a ECR2:n suihkulinjalla.

Voidaan siis valita suojausvaatimukseksi, että suihkulinjan suojan täytyy vähentää  $100 \mu\text{T}$ :n kohtisuora magneettivuo  $15 \mu\text{T}$ :n. Suojauskertoimen täytyy siis olla vähintään noin 7.

## 4.3 Suojan suunnitelma

### 4.3.1 Suojan muoto ja materiaali

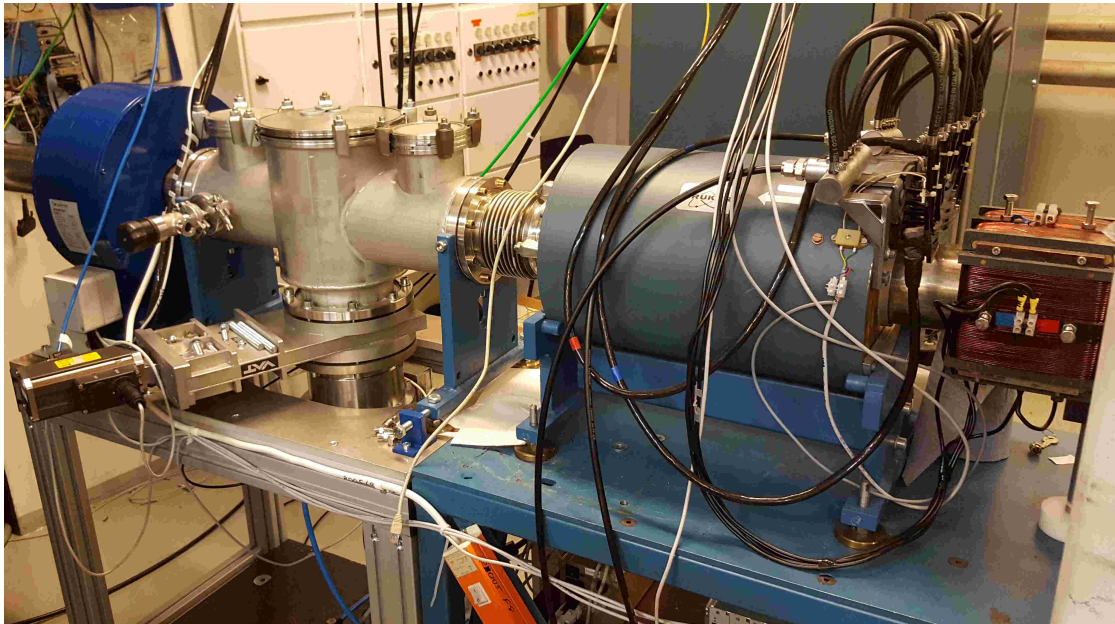
ECR2:n suihkulinjan muoto asettaa selkeitä rajoitteita suojan muodolle. Ionisuihkulinjan geometria on todella monimutkainen johtuen siitä, että siinä on paljon laitteistoa ja siihen tulevia putkia sekä johtoja. Täysin suljettua suojaa on siis mahdotonta tehdä. Kuvassa 25 on valokuvia ECR2:n suihkulinjasta.

Jälleen pyritään tekemään suojasta mahdollisimman yksinkertaisen mallinen sen käsittelyn, valmistamisen ja simuloimisen helpottamiseksi. Kuvassa 25a esitetyn pöydän päällä olevan ionisuihkulinjan päälle päätetään asettaa U:n mallinen kouru, joka lepää teräksisen pöytälevyn päällä. Näin suihkulinja saadaan ympäröityä teräksellä, mikä on ferromagneettisessa suojauksessa tärkeää, sillä ympäröiminen mahdollistaa tehokkaan suojaamisen.

Suojan muotoileminen U:n malliseksi, esimerkiksi laatikkomaisen ratkaisun sijaan, on useita etuja. Pyöreän päädyn tekeminen kulmikkaisen sijaan voi olla hieman vaikeampaa, mutta se voi vähentää hitsausliitosten määrää suojassa, joka parantaa suojan tehokkuutta. Tämä johtuu siitä, että suojamateriaali on todennäköisesti yhtenäisempi, jos se on valmistettu yhdestä osasta taivuttamalla kuin jos se olisi kasattu useasta erillisestä osasta. Pyöreä pääty myös ohjaa magneettivuota paremmin kuin neliskanttinen. Yleisesti ottaen ferromagneettisessa suojassa kannattaa välttää teräviä kulmia, sillä magneettivuo ei kykene tekemään äkkinäisiä käännöksiä muualla kuin kahden eri materiaalin rajapinnoissa, joten teräväkulmainen pääty vuotaa enemmän magneettikenttää suojan sisälle kuin pyöreä. Kaiken tämän lisäksi pyöreään päätyyn tarvitaan vähemmän suojamateriaalia kuin kulmikkaaseen.

ECR2:sta lähellä oleva osa ionisuihkulinjasta, joka on esitettyä kuvan 25b oikealla puolella, on erittäin haastavan muotoinen suojata. Suihkulinjaan tulee niin paljon putkia, joita ei voi siirtää, että suojassa tulee olemaan paljon reikiä. Kyseinen suihkulinjan osa täytyy todennäköisesti myös suojata, mutta tässä työssä sitä ei suunnitella.

Materiaaliksi valitaan jälleen rakenneteräs, saatavuuden ja hinnan takia. Vaikka  $\mu$ -metallilla suojaamista varten ei HIISIn hajakenttä tällä kertaa ole liian voimakas,  $\mu$ -metallin käyttö tässä tilanteessa olisi yliampuvaa. Suojakerroin 7 saadaan varmasti saavutettua myös helpommin saatavilla olevalla matalahiilipitoisella rakenneteräksellä. Ionisuihkulinjan suojissa tulee olemaan valtavasti suojamateriaalia, minkä vuoksi suojamateriaalin hankintahinta täytyy myös ottaa huomioon.



(a) Suihkulinjan suojattavan alueen loppupää.



(b) Suihkulinjan suojattavan alueen alkupää. Kuvan oikealla puolella oleva metallin värinen osa suihkulinjasta on erityisen haastava suojattava sen monimutkaisen geometrian vuoksi.

*Kuva 25:* Valokuvia ECR2:n suihkulinjan suojattavasta osasta. Ionisuihkun kulkusuunta on molemmissa kuvissa oikealta vasemmalle ja HIISI sijaitsee kameran takana.

### 4.3.2 Suojan simulaatiot ja mittaukset

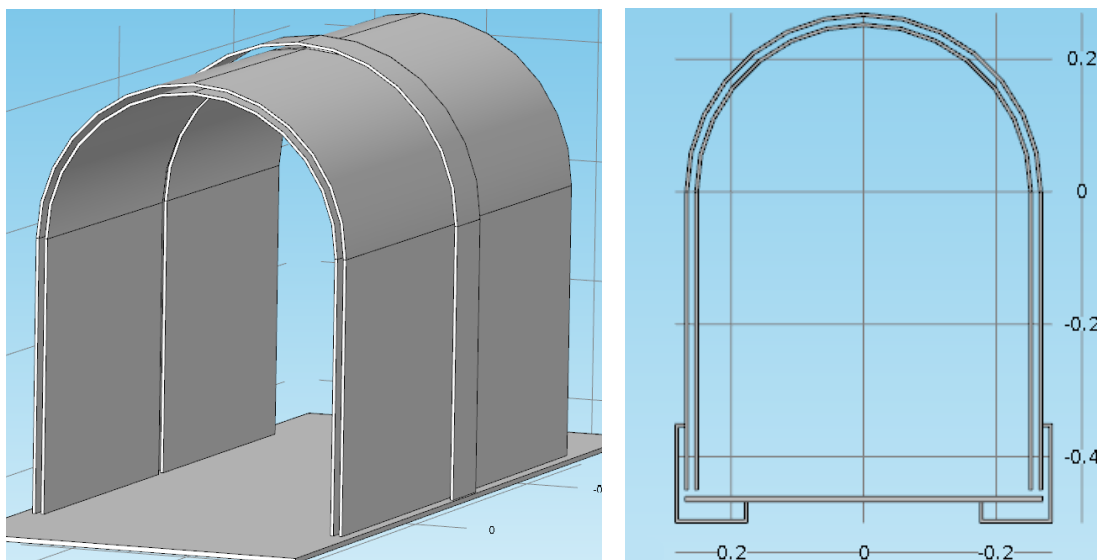
U:n mallista suojaa suorakulmaisen pöydän päällä simuloidaan sekä kaksiulotteisesti äärettömän pitkänä että kolmiulotteisesti. Kolmiulotteisilla simulaatioilla selvitetään erilaisten reunaefektien vaikutusta, mitä kaksiulotteisilla simulaatioilla ei voi tehdä.

Paikan päällä mitataan suojan vaadittavat mitat, jotta suoja kykenee peittämään koko suihkulinjan. Suihkulinjan alla olevan rautaisen pöytälevyn leveyden mitataan olevan 54 cm ja paksuuden 8 mm. Mittaushetkellä vielä toinen pöytälevyistä on alumiinia, mutta sekin päätetään vaihtaa teräksiseksi suojausta varten. Suojakourun täytyy mittausten perusteella olla 70 cm korkea ja 50 cm leveä. Päätetään tehdä simulaatiot nämä mitatut arvot lukittuina, jolloin simulaatioissa muutettava parametrijoukko pienenee ja erilaisten simuloitavien tilanteiden määrä vähenee huomattavasti.

Päätetään lähestyä suihkulinjaa peittäviä U:n mallisia suojia ja pöytälevyä samankaltaisella kaksiulotteisella datankeruumenetelmällä ja esitystavalla kuin tyhjiöpumppujen suojia suunnitellessa. Kerätään dataa äärettömän pitkältä pöytä-suoja-parista eri suojateräksen paksuuksilla ja muilla parametreilla. Kolmiulotteisilla simulaatioilla pyritään muodostamaan silta kaksiulotteisen ideaalimaailman ja todellisen kolmiulotteisen maailman välille. Kolmiulotteisten simulaatioiden avulla tutkitaan siis lähinnä reunaefektien vaikutusta suojien tehokkuuteen, jolloin kaksiulotteisia ideaalisia simulaatiotuloksia voidaan hyödyntää.

Mittausten perusteella kourusuojista täytyy tehdä suuret, jonka takia ne tulevat myös olemaan raskaita. Suojia halutaan pystyä myös helposti poistamaan suihkulinjan päältä, joten suojien ei tulisi olla liian vaikeita liikutella. Tämän takia kourusuojia halutaan paloittaa pienempiin helposti käsiteltäviin osiin. Kolmiulotteisilla simulaatioilla täytyy siis tutkia myös suojan paloittelun vaikutusta suojan tehokkuuteen.

Simuloidaan kolmiulotteisilla simulaatioilla suojakerroindataa metrin mittaisista kaksikerroksisista kourusuojista teräspöydän päällä. Suojattava kenttä on vaakasuuntainen ja kohtisuorassa suojien pituusakselia kohtaan. Kaksi esimerkkiä simulaatiokonfiguraatioista on esitettyinä kuvassa 26. Simulaatioita tehdään yksiosaisella kourulla sekä kaksi variaatiota puolesta välistä kahteen osaan katkaistusta kourusta, jonka osien välissä on kahden sentin ilmarako. Ensimmäinen kaksiosainen variaatio on osat sellaisenaan irti toisistaan, ja toisessa on peitetty osien välinen ilmarako teräskaistaleella, joka ei kosketa kuitenkaan kumpaakaan kourusuojaa, kuten kuvassa 26a. Näistä kolmesta tilanteesta simuloidaan myös sellaiset versiot, joissa mikään osa suojaelementeistä ei kosketa teräspöytää. Lisäksi tutkitaan koskemattomassa tilanteessa suojien ja teräspöydän väliin jäävän ilmaraon tilkitsemistä teräskaistaleella, joka ei koske suojaan tai pöytään, sekä



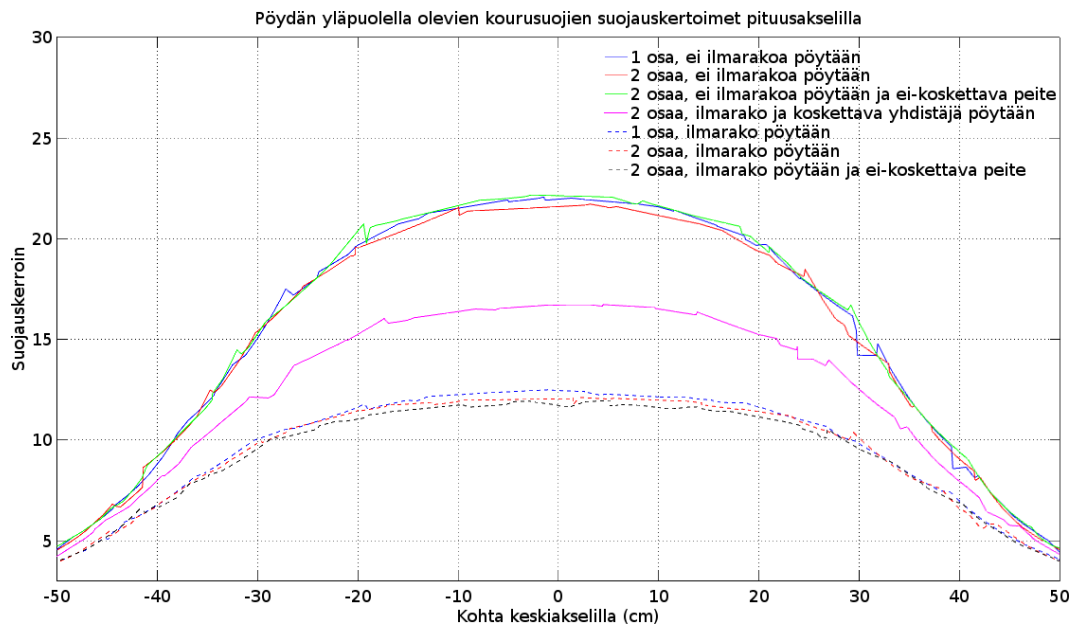
(a) Kaksiosainen suoja ja ei-koskettava peite. (b) Kourusuojan koskettava sivupeite.

*Kuva 26:* Simuloituja kourusuojia. Ruudunkaappaukset COMSOL:ista.

sellaisella teräslevyllä, joka on kiinni sekä suojassa että pöydässä, mutta kiinnityskohdat ovat kaukana suojan ja pöydän välisestä raosta. Jälkimmäinen tilanne on havainnollistettu ortograafisesti kuvassa 26b.

Kuvaan 27 on kerätty simulaatioista saadut suojauskertoimet suojien keskiakseleilta. Jälleen kolmiulotteisissa simulaatioissa on käytetty 5 mm paksua teräspeltiä suojan valmistamiseen. Kaikki suojat ovat näissä simulaatioissa myös kaksikerroksisia. Keskiakselin paikka on päätetty olemaan simuloituilla suojoilla pyöreän pään muodostavan puoliympyrän keskipisteessä, eli noin 20 cm suihku-  
linjan keskipisteen yläpuolella. Tuloksista huomataan, että onneksenne suojan paloittelu ei poikittaiselta kentältä suojatessa vaikuta juuri lainkaan suojauskertoimeen. Sen sijaan suojan ja pöydän koskettaminen vaikuttaa ratkaisevasti suojauskertoimeen. Paras suojauskerroin saavutetaan suojan ja pöydän ollessa yksi teräsvale ja huonoin suojan ja pöydän ollessa täysin erillään. Yhdistettäessä suoja pöytään edes jotenkin, mitä kuvan 26b konfiguraatiossa simuloitiin, suojauskerroin paranee jo merkittävästi. Lopulliset kourusuojat täytyy siis saada lepäämään teräspöydän päälle. Herää kuitenkin kysymys: miten hyvä kosketus voidaan realistisesti saavuttaa kourusuojien ja pöydän välille kiihdytinlaboratoriossa?

Teräspöydässä ja suojoissa tulee olemaan ajan myötä lommoja, kummatkaan eivät varmasti ole täysin suoria, ja pöydän ja suojien väliin pääsee likaa ja pölyä. Lisäksi lähes täydellisessäkin tilanteessa mikroskooppiset pinnanmuodot tekenevät sataprosenttisen kosketuspinnan käytännössä teoreettiseksi konseptiksi. Simulaatioissa sen sijaan suojat koskettavat pöytää täydellisesti, sillä simulaatioissa koskettaminen tarkoittaa kahden täysin sileän pinnan koskettamista täydellisesti

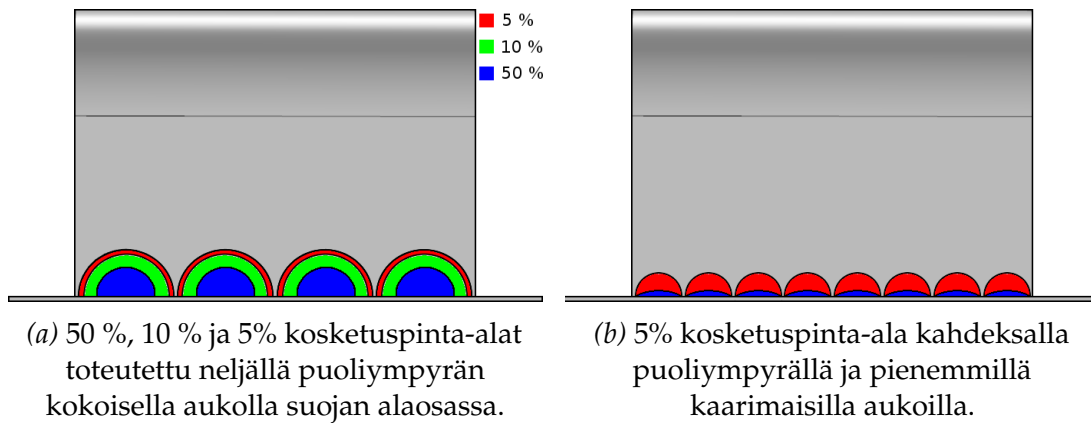


Kuva 27: Teräspöydän yläpuolella olevan metrin mittaisen kaksikerroksisen kourusuojan suojauskerroin sen keskiakselilla. Kolmiulotteiset simulaatiot tehty COMSOL:illa.

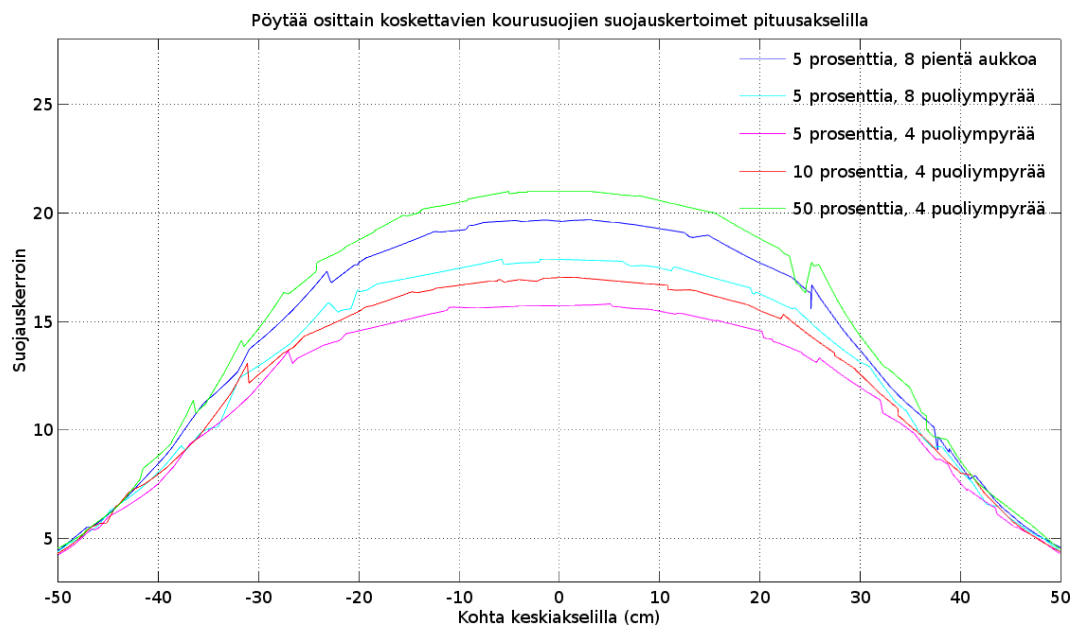
koko pinta-aloillaan. Toisin sanoen todellisuudessa kahden palasen koskettaminen simulaatioiden tasolla voidaan saavuttaa vain sulattamalla palaset yhteen täydellisesti. Tästä syystä myös paloiksi leikatun suojan tilkitsemistä tehtiin ei-koskettavilla teräslevyillä, sillä koskettavien teräslevyjen tilanne ei olisi juurikaan eronnut yksiosaisesta suojasta.

Mallinnetaan realistista pöydällä lepäämistä eli osittaista koskettamista muokkaamalla aiemmin tehtyä yksiosaisen kourusuojan simulaatiota leikkaamalla pieniä aukkoja yksiosaisen kourun alaosaan. Simuloidaan suojauskertoimia kosketuspinta-alan ollessa 50 %, 10 % ja 5 % kokonaispinta-alasta. Simulaatiomallin tekemisen helpottamiseksi käytetään neljää puoliympyrää aukkoina, jotka leikataan suojista pois. Kuvassa 28a on havainnollistettu aukot, jotka leikataan suojista. Viiden prosentin tilanteessa kuitenkin neljä puoliympyrää leikkaa niin paljon suojan pinta-alaa pois, että simuloidaan myös kahdeksan puoliympyrän sekä kahdeksan pienemmän aukon tilanteet kuvan 28b mukaisesti, jotta nähdään vaikuttaako pinta-alan poistaminen ratkaisevasti.

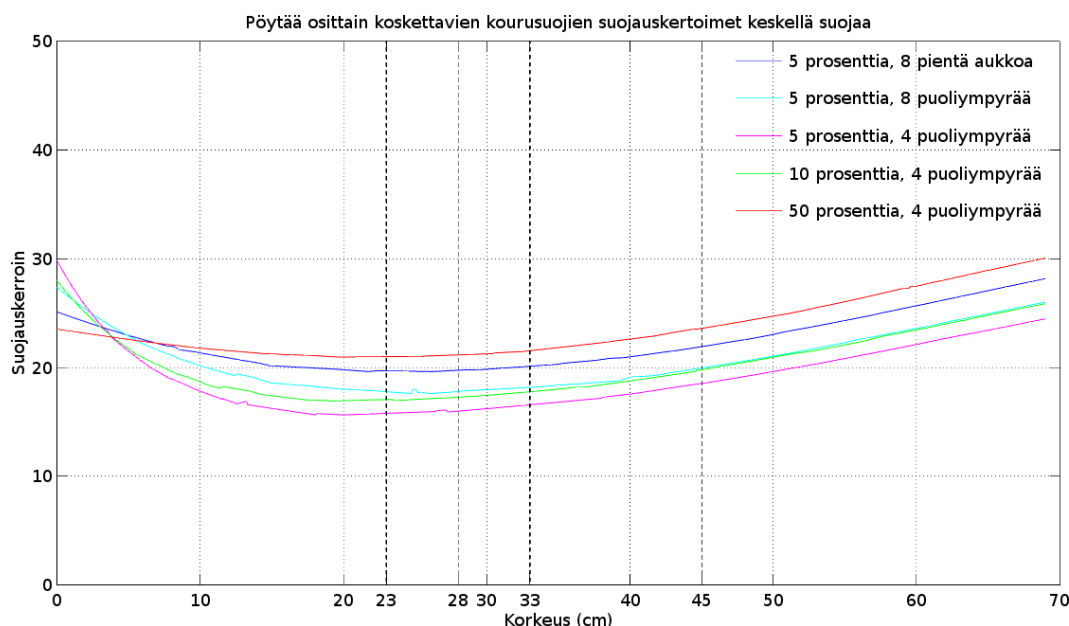
Osittaisen kosketuksen simulaatioista kerättyä suojauskerroindataa on esitetty kuvissa 29 ja 30. Kuvan 29 tulokset on kerätty kourun pituusakselin suuntaisesti, kourun päätyosan muodostavan puoliympyrän keskipisteestä. Kuvan 30 tulokset on kerätty suojan keskipisteestä pystysuunnassa, pöydän pinnasta suojamateriaalin sisäreunaan asti. Kuvaan on merkitty katkoviivoilla suihkulinjan paikka välille 23 cm ja 33 cm sekä kohta 45 cm, jossa sijaitsee keskiakseli, josta pitkittäiset simulaatiotulokset on kerätty.



Kuva 28: Osittaisen kosketuksen luomisen havainnollistaminen.



Kuva 29: Teräspöytää osittain koskettavan metrin mittaisen kaksikerroksisen kourusuojan suojauskertoimet sen keskiakselilla. Kolmiulotteiset simulaatiot tehty COMSOL:illa.

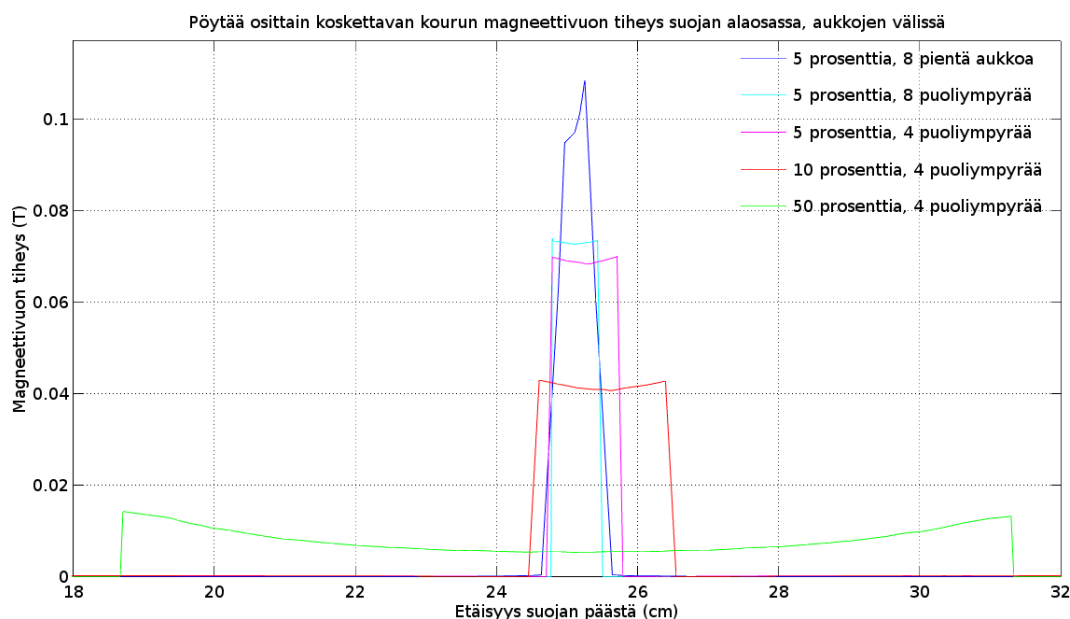


*Kuva 30:* Teräspöytää osittain koskettavan metrin mittaisen kaksikerroksisen kourusuojan suojauskertoimet sen keskikohdassa pystysuunnassa. Suihkulinjan paikka on merkitty välille 23...33 cm ja pitkittäisten simulaatioiden keskiakselin korkeus on 45 cm. Kolmiulotteiset simulaatiot tehty COMSOL:illa.

Simulaatiotulosten perusteella jopa vain hyvin pienellä osalla pöytää koskettava suoja on lähes yhtä tehokas kuin täysin pöytää koskettava suoja. Pienemmän pinta-alan aukot ja aukkojen lisääminen myös paransivat suojan tehokkuutta, joten todellisuudessa 5 %:sesti koskettava suoja on vielä hieman parempi kuin saatu tulos, sillä aukkoja on paljon ja ne ovat hyvin pieniä. Osittaisesta koskettamisesta täytyy vielä selvittää saturoitumisherkkyys. Suojan osittainen koskettaminen pöytään tarkoittaa sitä, että magneettikentän täytyy kulkea suojasta pöytään ja päinvastoin pienistä pullonkauloista. Käytännössä 5 %:sesti koskettavan suojan tilanteessa täytyy koko suojan läpi kulkevan magneettikentän pakkautua paikallisesti 5 %:iin sen aiemmasta kulkemislevydestä.

Kerätään suojien pituusakselin suuntaisesti magneettivuon tiheysdataa suojamateriaalia pitkin, aukkojen alaosista. Kuvassa 31 on esitetty yhden sisemmän teräskerroksen pullonkaulan magneettivuon tiheydet kaikille osittaisen kosketuksen simulaatioille. Tuloksena saadaan, että 5 %:n tilanteessa pienillä aukoilla magneettivuo kasvaa suurimmaksi pullonkaulassa. Se jää kuitenkin noin 5 %:iin teräksen saturoitumisrajasta, taustakentän ollessa  $200 \mu\text{T}$ . Ulommassa kerroksessa magneettivuon tiheydet ovat noin kaksinkertaisia kuvan 31 tuloksista, joka jää yhä noin 10 %:iin saturaatorajasta. HIISin hajakentän vuon tiheys suihkulinjalla on huomattavasti pienempi kuin  $200 \mu\text{T}$ , joten saturoitumisen muodostuminen ongelmaksi on epätodennäköistä. Osittainen kosketus pöydän ja kourusuojan välillä tarjoaa siis lähes yhtä hyvän suojauskertoimen kuin täydellinen kosketus,



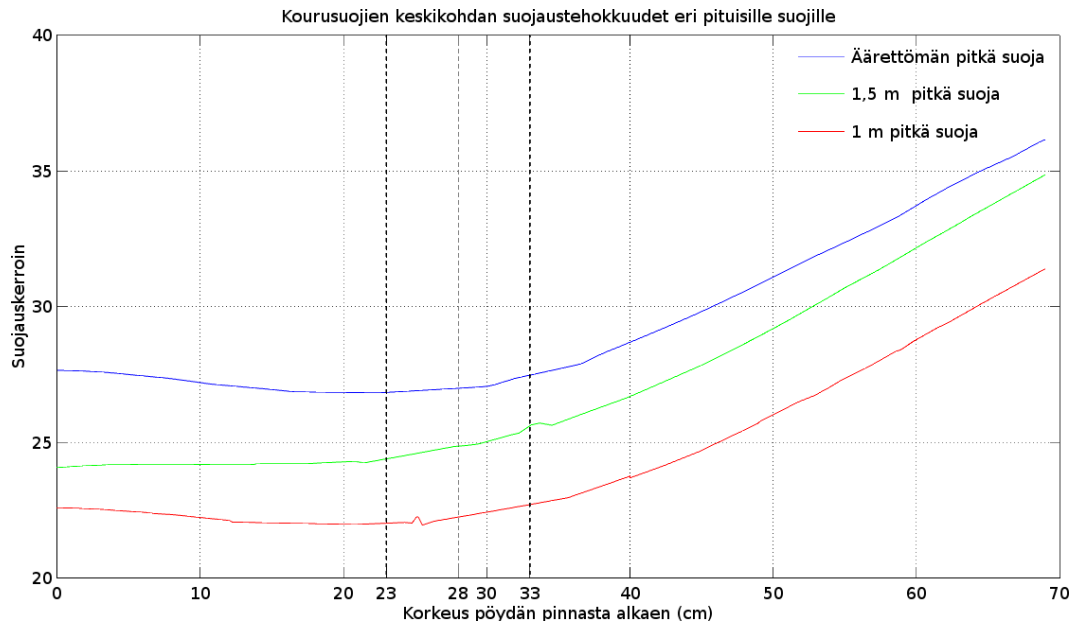


*Kuva 31:* Teräspöytää osittain koskettavan metrin mittaisen kaksikerroksisen kourusuojan magneettivuon tiheys kapeassa kohdassa aukkojen välissä sen alaosassa. Vuon tiheydet mitattu sisemmästä kerroksesta, ulomman kerroksen vastaavat arvot ovat noin kaksinkertaiset. Kolmiulotteiset simulaatiot tehty COMSOL:illa.

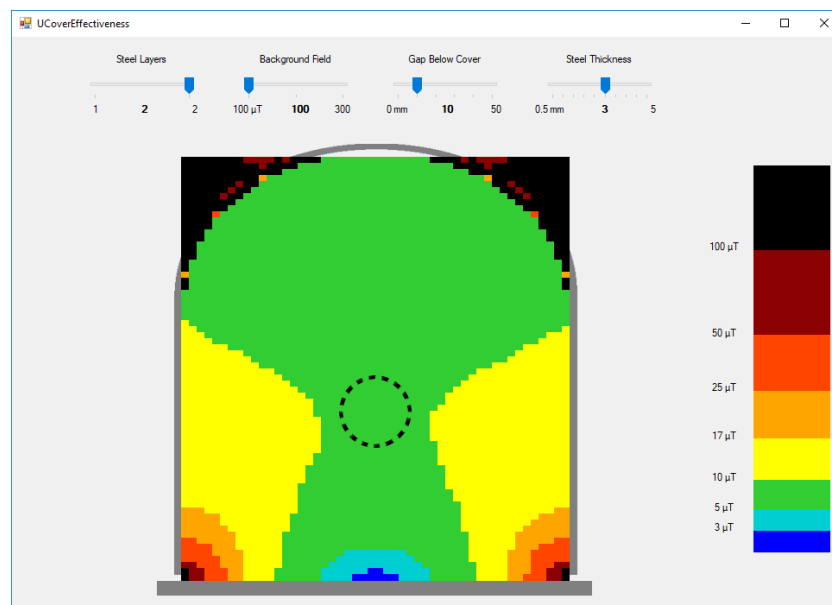
joten suojaus voidaan suunnitella täydellisen kosketuksen perusteella pienellä varmuusvaralla.

Lopullista suojien valintaa varten halutaan kerätä simulaatiodataa kaksiulotteisesti samantapaisella menetelmällä kuin tyhjiöpumppuja suojatessa luvussa 3.2.2. Kuvassa 32 on vertailtu kaksiulotteisen, eli äärettömän pitkän suojan ja pöydän, sekä äärellisen pituisten suojan ja pöydän suojauskertoimia. Metrin mittainen suoja on noin 20 % heikompi ja puolentoista metrin mittainen suoja hieman päälle 10 % heikompi suojan keskellä kuin äärettömän pitkä suoja. Lisäksi äärellisen pituisten suojien suojauskerroin tippuu voimakkaasti suojan reunoja lähestyttäessä, kuten kuvasta 27 voi nähdä. Päädyn heikentävän vaikutuksen voidaan todeta olevan merkityksetön noin 30 cm päädyistä suojan sisäpuolella. Kourusuojilla halutaan suojata noin 180 cm pitkä osa suihkulinjaa, josta noin kolmasosa tulee siis olemaan päätyefektien vuoksi hieman huonommin suojattu. Kaksiulotteisten simulaatioiden perusteella tehtävä valinta täytyy siis tehdä varmuusvaralla, jota alunperin liioittelemalla valittu  $100 \mu\text{T}$  homogeeninen kenttä auttaa.

Tehdään graafisella käyttöliittymällä varustettu ohjelma, jonka avulla voidaan tarkastella kaksiulotteisia FEMM:illä kerättyjä simulaatiotuloksia ja josta on ruudunkaappaus esitetty kuvassa 33. Simulaatiotulosten mukaan kaksikerroksinen suoja on niin paljon yksikerroksista tehokkaampi, että päätetään tehdä suojaan



Kuva 32: Äärettömän kaksikulotteisen ja äärellisten kolmiulotteisten kourusuojien tehokkuuksien vertailu. Kaikki simulaatiot tehty kaksikerroksisille, 5 mm paksuisesta teräspellistä valmistetuille suoille, jotka lepäävät teräspöydän päällä. Suihkulinjan paikka on merkitty kuvaan välille 23...33. Kaksikulotteinen simulaatio tehty FEMM:illä ja kolmiulotteinen COMSOL:illa.



Kuva 33: Graafinen käyttöliittymä suihkulinjan suojauksen tehokkuuden tarkastelua varten. Suojan ominaisuuksia ja taustakentän voimakkuutta voi säätää yläosassa olevista liukusäätimistä. Kuvaan on merkitty suihkuputki mustalla katkoviivalla. Simulaatiodataa on kerätty äärettömän pitkälle suoille ja pöydälle FEMM:illä.

kaksi kerrosta. Valitaan pöytää koskettavalle suojalle paksuus, joka riittää kaksiu-  
lotteisten simulaatioiden perusteella lievällä varmuusvaralla  $100 \mu\text{T}$  häiriökentän  
tapauksessa. Suojamateriaalin paksuudeksi valitaan 3 mm ja suojien tehokkuuk-  
sien parantamiseksi päätetään yhdistää kourusuoja pöytään entistä paremmin  
suojan sivuun kiinnitettävällä teräslevyllä.

## 5 Päätelmät

Luvussa 2 käsiteltiin myöhempien lukujen ymmärtämisen kannalta tärkeät teoreettiset käsitteet ja yhtälöt. Magneettikentän suojaamisen käsittelyä varten esiteltiin magneettikenttien matemaattinen esitysasu sekä niiden käytöstä kuvaavat yhtälöt. Magneettikentän vaikutus varattuihin hiukkasiin käsiteltiin, jotta ionisuihkun suojaamisen tarve ymmärretään. Seuraavaksi käsiteltiin tapoja luoda magneettikenttää, erityisesti sähkömagneetti, jotta voidaan perustella hajakentän syntyminen ja oleellimmat seikat magneettikentän luomisesta. Tämän jälkeen voitiin siirtyä magneettikentän suojaamisen teoriaan. Lisäksi esiteltiin työssä käytettyjen numeeristen simulaatioiden toimintaperiaate yleisellä tasolla.

Luvussa 3 käsiteltiin HIISIn tyhjiöpumppujen suojien suunnitteluprosessi tämän työn osalta. Suojattavan magneettikentän suuruutta ja suuntaa kartoitettiin HIISIn hajakentän simulaatioilla. Häiritsevän magneettikentän ominaisuuksien ja tyhjiöpumppujen valmistajien ilmoittamien maksimimagneettikenttien perusteella voitiin suunnitella kullekin pumpulle riittävän tehokkaat suojaukset. Tyhjiöpumppujen ollessa yhteydessä HIISIn plasmakammioon, eivät pumppujen suojat voi olla täysin umpinaisia. Käsittelyn, valmistamisen ja simulaatioiden helpottamiseksi suojista päätettiin tehdä putkia, joista toinen pää on suljettu.

Putkimaisen suojan todettiin suojaavan heikoiten pitkittäiseltä kentältä, joten pitkittäisen häiriömagneettikentän todettiin olevan suojaamisen kannalta haastavin tilanne. Suojakerrosten lisäämisen todettiin olevan hyödytöntä pitkittäiseltä kentältä suojatessa verrattuna yhden kerroksen paksuntamiseen, joten suojat päätettiin tehdä yksikerroksisiksi.

Suojien materiaaliksi valittiin helpon saatavuuden ja edullisuuden vuoksi matalahiilipitoinen rakenneteräs, Fe 37 B. Tyhjiöpumppuja ympäröivien geometrioiden perusteella valittiin kunkin pumpun suojan dimensiot pumppukohtaisesti. Teräslevyn paksuuden ja suojaputkien pituuksien vaikutusta simuloitiin kaksiuotteisilla pyörähdysymmetrisillä simulaatioilla ja simulaatiotulokset esitettiin graafisella käyttöliittymällä varustetulla Windows-ohjelmalla. Simulaatiotulosten perusteella valittiin tyhjiöpumppujen suojamateriaalien paksuudet kullekin suojalle erikseen. Kaikkien suojien suojaterästen paksuuksiksi valittiin 3 mm.

Luvussa 4 käytiin läpi ECR2:n suihkulinjan suojauksen suunnitteluprosessi tämän työn osalta. Ionisuihkun herkkyyttä häiritsevälle magneettikentälle tutkittiin sekä ionioptisilla simulaatioilla että mittauksilla paikan päällä. Mittauksissa HIISIn kelojen virtojen arvoja muutettiin ja magneettivuon tiheyttä ECR2:n suihkulinjalla sekä ionisuihkun syklotronin jälkeistä intensiteettiä mitattiin. Ionisuihkun simulaatioiden ja mittausten perusteella valittiin maksimaaliseksi häiriökentäksi  $15 \mu\text{T}$ , jonka sallitaan läpäisevän suunniteltava magneettinen suojaus. Tällöin ECR2:n ionisuihkun intensiteetin pitäisi pienentyä enimmillään 5 %

HIISIn hajakentän vuoksi.

Suojattavan magneettikentän suuruutta ja suuntaa kartoitettiin simuloimalla HIISIn tuottamaa magneettikentää. Simulaatioiden perusteella valittiin suojien suunnittelemista varten suurimmaksi magneettikentäksi, johon suojien tulee riittää,  $100 \mu\text{T}$  täysin suihkulinjaa vastaan kohtisuorassa oleva magneettikenttä. Suihkulinjan suuntaisen magneettikentän todettiin olevan merkityksetön ionisuihkun kannalta. Valinnassa on hieman varmuusvaraa, jonka arvioitiin olevan tarpeellista, sillä suojien hyvyssimulaatioita vastaavaa ideaalista tilannetta voi olla haastavaa saavuttaa todellisuudessa.

ECR2:n suihkulinjan suojien malliksi valittiin U:n mallinen kouru, joka asetetaan teräksestä valmistetun pöytälevyn päälle siten, että kourusuoja ja pöytälevy muodostavat suljetun silmukan suihkulinjan ympärille. Kourusuojien dimensiot selvitettiin mittaamalla, ja niiden leveyden vaaditaan olevan 45 cm ja korkeuden 70 cm. Suojamateriaaliksi valittiin jälleen matalahiilipitoinen rakenneteräs Fe 37 B sen hyvän saatavuuden vuoksi.

Teräspöydän päällä lepäävän kourusuojan suojaustehokkuutta simuloimalla huomattiin, että pöydän ja suojien välinen kosketus on suojaustehokkuuden kannalta erittäin tärkeää. Todellisuutta vastaavaa kosketuspintaa simuloitiin leikkaamalla kourusuojista palasia pois, jotta suojien ja pöydän välistä kosketuspinta-alaa saatiin vähennettyä, pienimmillään 5 %:iin. Osittain pöytää koskettavan kourusuojan todettiin olevan lähes yhtä tehokas kuin 100 %:n kosketuspinta-alan suoja. Todettiin myös, että pienennetty kosketuspinta-ala suurentaa vuon tiheyttä paikallisesti pullonkaulakohdissa suojan alaosassa, mutta ei riittävästi teräksen saturoimiseksi. Myös kourusuojien pilkkomista pituussuunnassa useaan palaseen simuloitiin. Maltillisen pilkkomisen todettiin olevan merkityksetöntä suojan tehokkuuden kannalta, joten suoja voidaan rakentaa useasta helposti käsiteltävästä palasesta.

Tehtyjen tutkimusten perusteella pystyttiin arvioimaan vaadittavaa varmuusvaraa, jotta suojien dimensiot voidaan valita ideaalisen tilanteen perusteella. Kaksiulotteista, äärettömän pitkää kourusuojaa ja pöytää simuloitiin ja dataa kerättiin muun muassa suojateräksen paksuuden ja kerrosten määrän suhteen. Simulaatiotulokset esitettiin graafisella käyttöliittymällä varustetun Windows-ohjelman avulla ja kyseisen ohjelman avulla valittiin suojien ominaisuudet. Suojat päätettiin tehdä kahdesta kerroksesta 3 mm:n paksuista teräslevyä.

Tämän tekstin kirjoittamisen aikana tyhjiöpumppujen suojaukset ovat valmistettu ja asennettu paikoilleen, mutta suihkulinjan suojat ovat vielä valmistusvaiheessa. Tyhjiöpumpuille tehtyjen suojien ansiosta HIISiä on käytetty onnistuneesti vaurioittamatta tyhjiöpumppuja.

Suihkulinjan suojien muoto on käytännöllinen käsittelemisen ja valmistamisen

kannalta, mutta magneettikentältä suojaamisen kannalta ne voisivat olla huomattavasti tehokkaamman muotoiset. Suojissa on paljon tasaista peltiä kohtisuorassa suojattavaa magneettikenttää kohtaan. Tehokkain suoja olisi ympyrän mallinen, sillä magneettikentän rajapintaehtojen vuoksi magneettikenttä kulkee rajapinnasta muuttumattomana vain läpäistessään sen normaalin suunnassa. Tiheimmän permeabiliteetin materiaaliin siirtyessään magneettikenttä taittuu, kuten valo taittuu siirtyessään optisesti harvempaan materiaaliin eli rajapinnan normaalista pois päin. Taittuminen tapahtuu, sillä rajapinnan normaalin suuntainen vuon tiheys ei voi muuttua rajapinnassa, mutta rajapinnan tangentin suuntainen vuon tiheys voi. Tällöin siirryttäessä korkeamman permeabiliteetin omaavaan materiaaliin, rajapintaan vinottain tuleva magneettikenttä taittuu kulkemaan enemmän rajapinnan suuntaisesti ja ympyrämaisena suojauksen tapauksessa ohjautuu kulkemaan suojamateriaalia pitkin ohi suojattavasta alueesta. Suojien simulaatiot kuitenkin ovat haastavammasta tilanteesta kuin HIISIn hajakenttä on, sillä simulaatiot tehtiin homogeenisessa vaakasuuntaisessa magneettikentässä, kun HIISIn hajakenttä on vaakasuunnassa suihkulinjalla ainoastaan sen keskiakselin korkeudella. Tällöin todellisessa tilanteessa HIISIn hajakenttä ohjautuu paremmin kourusuojan kautta ohi suojattavasta alueesta kuin simuloitu homogeeninen kenttä.

Jos kuitenkin käy ilmi, että rakennetut suihkulinjan suojat eivät ole riittävän tehokkaita, niitä voi kokeilla tehostaa tekemällä esimerkiksi pienen taitoksen keskelle kourun tasaista osaa. Tällöin kourun sivu saataisiin enemmän vinoon, jonka pitäisi parantaa hieman suojan tehokkuutta.

Työssä ei tutkittu HIISIn ympäröimistä magneettisella suojalla, herkkien alueiden paikallisen suojaamisen sijaan. HIISIn itsensä suojaaminen pienentäisi sen vuotokenttää, mahdollisesti poistaen tarpeen suojata herkkiä alueita myös tulevaisuudessa. Tämä vaihtoehto kuitenkin sivuutettiin hyvin aikaisessa vaiheessa, sillä HIISIn ympäröimisen suojalla todettiin olevan epäkäytännöllistä. Suoja tulisi olemaan suuri ja raskas, jolloin suojan poistaminen HIISIn käsiksi pääsemiseksi olisi todennäköisesti huomattavasti haastavampaa kuin tässä työssä suunniteltujen pienien suojien poistaminen.

## Lähteet

- [1] H Koivisto, P Heikkinen, V Hänninen, A Lassila, H Leinonen, V Nieminen, J Pakarinen, K Ranttila, J Ärje, and E Liukkonen. The first results with the new JYFL 14 GHz ECR ion source. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 174(3):379 – 384, 2001.
- [2] Hannu Koivisto, Olli Tarvainen, Taneli Kalvas, Kimmo Ranttila, Pauli Heikkinen, D Xie, G Machicoane, T Thuillier, V Skalyga, and I Izotov. HIISI, new 18 GHz ECRIS for the JYFL accelerator laboratory. *Proceedings of ECRIS 2014: the 21st International Workshop on ECR Ion Sources*, ISBN 978-3-95450-158-8, 2014.
- [3] T. Kalvas, O. Tarvainen, J. Komppula, M. Laitinen, T. Sajavaara, H. Koivisto, A. Jokinen, and M. P. Dehnel. Recent negative ion source activity at jyfl. *AIP Conference Proceedings*, 1515(1):349–358, 2013.
- [4] Richard Geller. *Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas*. CRC Press, 1996.
- [5] A Girard, D Hitz, G Melin, and K Serebrennikov. Electron cyclotron resonance plasmas and electron cyclotron resonance ion sources: Physics and technology. *Review of scientific instruments*, 75(5):1381–1388, 2004.
- [6] Kenneth L Kaiser. *Electromagnetic shielding*. Crc Press, 2005.
- [7] T J Sumner, J M Pendlebury, and K F Smith. Conventional magnetic shielding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 20(9):1095, 1987.
- [8] Jian-Ming Jin. *The finite element method in electromagnetics*. John Wiley & Sons, 2015.
- [9] David Meeker. *Finite Element Method Magnetics: User’s manual*. Version 4.2. <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>, Huhtikuu 2015. [Viitattu 23.7.2017].
- [10] COMSOL *Multiphysics Quick Start and Quick Reference*. [https://extras.csc.fi/math/comsol/3.4/doc/multiphysics/wwhelp/wwhelp1/js/html/wwhelp.htm?context=multiphysics&file=html\\_quickintro.1.1.html](https://extras.csc.fi/math/comsol/3.4/doc/multiphysics/wwhelp/wwhelp1/js/html/wwhelp.htm?context=multiphysics&file=html_quickintro.1.1.html). [Viitattu 23.7.2017].
- [11] T. Kalvas, et. al. IBSIMU: A three-dimensional simulation software for charged particle optics. *Review of Scientific Instruments*, 81, 02B703, (2010).