

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0250 Energiatekniikan kandidaatintyö

SIMULATE 3- sydänsimulaattoriohjelmiston
laskentatarkkuus

Accuracy of SIMULATE 3 -core simulator

Työn tarkastaja: Heikki Suikkanen

Työn ohjaaja: Matti Paajanen, Heikki Suikkanen

Lappeenranta 16.12.2020

Tiia Heino

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Tiia Heino

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Matti Paajanen, Heikki Suikkanen

Kandidaatintyö 2020

35 sivua, 16 kuvaa ja 2 liitettä

Hakusanat: SIMULATE-3, Olkiluoto, palama, tehojakauma

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on selvittää, kuinka tarkasti Olkiluodon kiehutusvesilaitoksilla käytettävä SIMULATE-3-sydänsimulaattoriohjelmisto laskee reaktorisydämen tehojakauman sauvanooditasolla. Erityisesti tutkimuksessa kiinnostaa, kuinka tarkasti simulaattoriohjelmisto mallintaa polttoainesauvan tehoprofiilin säätösauvan läheisyydessä.

Tutkimus toteutettiin vertaamalla aiemmin tehdyistä tehoprofiilimittauksista saatuja tuloksia nykyisen simulaattoriohjelmiston laskemiin tehojakaumiin. Tehoprofiilimittaukset perustuivat La-140- isotoopin lähettämän gammasäteilyn mittaamiseen, joten simulaattoriohjelmiston mallintamat tehoprofiilit muokattiin vertailukelpoiseen muotoon.

Mittaus- ja simulaatitulosia vertaamalla havaittiin, että säätösauvan sijainti polttoainesauvaan nähdessä vaikuttaa laskentatarkkuuteen. Tämä voitiin havaita molemmista tutkittavista polttoaine-elementeistä. Laskentatarkkuus vaikuttaa olevan huonoimmillaan hilan säätösauvan vastaisessa nurkassa. Myös säätösauvan sisänurkan luona sijaitsevilla sauvoilla laskentatarkkuus on keskimääräistä huonompi. Keskivaiheilla polttoainesauvahilaa laskentatarkkuus oli tasaisempaa. Syynä tähän vaihteluun voi olla esimerkiksi polttoaineen väkevyyden vaihtelu elementin poikkileikkauksen läpi.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	6
1.1 Työn tarkoitus ja tavoitteet.....	6
2 Olkiluodon ydinvoimalaitos	8
2.1 Kiehumisvesireaktorin toimintaperiaate.....	8
2.2 Polttoaine.....	9
3 Reaktorisydämen mallinnus	12
3.1 Mallinnuksen peruseriaatteen.....	12
3.1.1 Fickin laki	14
3.1.2 Jatkuvuusyhtälö.....	14
3.1.3 Diffuusioyhtälö	15
3.2 Reaktorisydämen simulointijärjestelmä	15
3.3 Mallinnustulosten todentaminen	16
4 Sydänsimulaattorin laskentatarkkuuden määrittäminen	18
4.1 Tehoprofiilien laskeminen.....	19
4.1.1 Ba-140 ja La-140 isotooppien synty	19
4.1.2 Lantaanin aktiivisuuden laskeminen	20
5 Tulokset	24
5.1 Virheen arviointi.....	28
5.2 Johtopäätökset	31
6 Yhteenveto	33
Lähdeluettelo	35
Liite 1. Elementin 1 Yksittäisten sauvojen tehoprofiilit	37
Liite 2. Elementin 2 Yksittäisten sauvojen tehoprofiilit	42

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

k	kasvutekijä	[-]
P	teho	[MW]
q	lineaariteho	[W/cm], [W]
s	Ba-140 isotoopin syntyvauhti	[-]
t	aika	[s]
$T_{1/2}$	puoliintumisaika	[s]

Kreikkalaiset aakkoset

λ	hajoamisvakio	[1/s]
ε	nopean fission tekijä	[-]
η	fissiosta syntyvien neutronien lukumäärä	[-]

Dimensiottomat luvut

f	terminen käyttösuhde
p	resonanssinvälttämistodennäköisyys
P_{nl}	vuodonvälttämistodennäköisyys

Alaindeksit

B	barium-140
L	lantaani-140
lin	lineaarinen
m	muotokerroin
th	terminen

1	alku
2	loppu, muutos
∞	ääretön

Lyhenteet

APRM	Average Power Range Monitoring
BU	Burn Up
BWR	Boiling Water Reactor
EFPH	Equivalent Full Power Hour
LPRM	Local Power Range Monitoring
OL	Olkiluoto
TIP	Traversing Incore Probe
TVO	Teollisuuden Voima Oyj

1 JOHDANTO

Ydinvoima on eräs merkittävimmistä sähköntuotantotavoista Suomessa luotettavuutensa ja turvallisuutensa vuoksi, ja sillä tuotettiin lähes kolmannes Suomen sähköstä vuonna 2018. (Tilastokeskus, 2019). Ydinvoimalla on suuri rooli puhtaassa energiantuotannossa ja ilmastonmuutoksen hillitsemisessä, koska ydinvoimalla tuotetusta sähköstä ei aiheudu hiilidioksidipäästöjä ilmakehään. Ydinvoimasta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt syntyvät pääosin laitosten rakennus- ja purkuvaiheesta sekä polttoaineen ja materiaalien hankinnasta, jotka nekin ovat hyvin vähäisiä. (Vattenfall, 2019)

Suomen ydinvoimalaitokset ovat lauhdutusvoimalaitoksia, eli sähköntuotannossa ydinvoimalaitoksen perustoimintaperiaate on sama, kuin minkä tahansa muunkin höyryvoimalaitoksen. Polttoaineeseen sitoutuneen kemiallisen energian vapautuessa prosessissa kiertävä vesi höyrystyy, ja muodostuneen höyryn sisältämä energia muunnetaan turbiinin siivistön avulla mekaaniseksi energiaksi ja lopulta generaattorilla sähköksi. Erona muihin höyryvoimalaitoksiin on tapa, jolla polttoaineen kemiallinen energia muuntuu lämpöenergiaksi. Ydinpolttoaineen kemiallinen energia vapautuu lämpönä hallitun fissioketjureaktion seurauksena (Vattenfall, 2019). Uraanin fissiossa vapautuu merkittäviä määriä energiaa, jolloin jo pienestä määrästä polttoainetta voidaan tuottaa suuria määriä lämpöä.

1.1 Työn tarkoitus ja tavoitteet

Reaktorisydämen käyttäytymistä mallinnetaan esimerkiksi tulevien käyttöjaksojen polttoainelatausta suunniteltaessa. Käyttöjaksoksi kutsutaan aikaa kahden polttoaineenvaihdon välillä, eli noin vuoden pituista ajanjaksoa. Mallinuksissa oleellista on huomioida reaktorin turvallinen ja tasainen tehontuotto koko käyttöjakson ajan.

Reaktorisydämen tehojakauman mallintamisessa joudutaan tekemään melko paljon yksinkertaistuksia ja oletuksia monimutkaisten asioiden mallintamista varten. Vaikka näillä yksinkertaistuksilla ei ole suuressa mittakaavassa merkitystä esimerkiksi kriittisyysturvallisuudelle, sydänsimulaattorihjelmiston tekemisiin mallinuksisiin voi syntyä virhettä (Paajanen, 2018). Tämä virhe voi vaikuttaa polttoaineen kestävyYTEEN, mikäli jossain polttoainesauvassa vaikuttaa uskottua suurempi lineaariteho.

Eräs varmimmista tavoista varmistua sydänsimulaattorin laskentatarkkuudesta on verrata simulaattoriohjelmiston laskemia reaktorisydämen tehojakaumia mitattuun dataan. Mittausdataa on kuitenkin rajallisesti. Vuonna 1989 suoritettiin kahdelle OL2:lla sijaitsevalle polttoaine-elementille polttoainesauvojen tehoprofiilimittauksia. Kaikkia mitattujen polttoaine-elementtien sauvoja ei kuitenkaan mitattu, vaan ensimmäisestä elementistä mitattiin tehoprofiilit 29 polttoainesauvalle ja toisesta elementistä 30 sauvalle. Sauvojen tehojakaumat mitattiin sauvanoodi kerrallaan.

Tämän työn tarkoituksena on tutkia, kuinka tarkasti reaktorisydämen simulaattoriohjelmisto laskee polttoaine-elementtien tehojakaumat sauvanooditasolla. Vertailupohjana käytössä olevan SIMULATE-3:n simuloimiin ja laskemiin tehojakaumiin käytetään vuonna 1989 suoritetuista tehoprofiilimittauksista saatuja mittaustuloksia. Gammamittauksissa mitattiin kaksi aksiaalisuuntaisesti identtistä 8x8 tyyppistä polttoaine-elementtiä, jotka sijaitsivat eri säätösauvojen ajoryhmissä, ja olivat eri puolilla reaktoria. Elementit olivat olleet yhden käyttöjakson ajan reaktorissa.

Samankaltainen tutkimus on suoritettu aiemmin vuonna 2014 Teknologian tutkimuskeskuksen (VTT) toimesta silloisen simulaattoriohjelmiston laskemien arvojen avulla (Ikonen, 2014).

Työn tarkoituksena on vastata ainakin seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

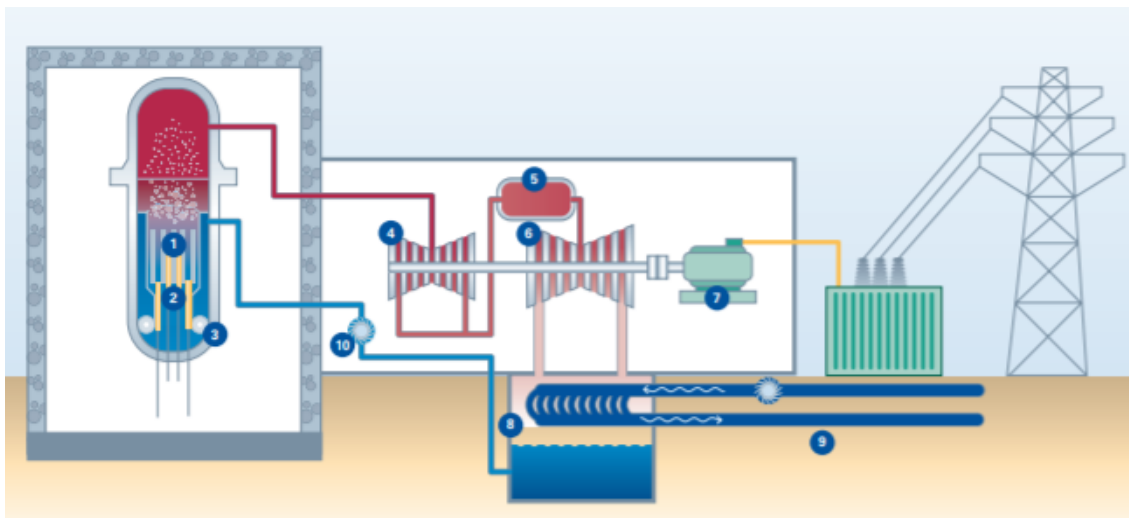
1. Kuinka tarkasti SIMULATE-3 laskee polttoaine-elementtien tehojakaumat
 - sauvatasolla?
 - nooditasolla?
2. Vaikuttaako polttoainesauvan etäisyys säätösauvasta merkittävästi laskentatarkkuuteen?

2 OLKILUODON YDINVOIMALAITOS

Eurajoella Olkiluodon saarella sijaitsee Teollisuuden Voima Oyj:n (TVO) omistama Olkiluodon ydinvoimalaitos, joka tuotti vuonna 2019 noin kuudenneksen koko Suomen sähkönkulutuksesta (Teollisuuden Voima Oyj, 2020). Olkiluodossa on kaksi toiminnassa olevaa laitosyksikköä sekä yksi rakenteilla oleva. Toiminnassa olevat laitosyksiköt, Olkiluoto 1 (OL1) ja Olkiluoto 2 (OL2) ovat keskenään identtisiä, sähköteholtaan 800 MW:n kiehausvesireaktoreita (boiling water reactor, BWR). Lämpötehoa käyvät laitokset tuottavat 2500 MW. Rakenteilla oleva laitos, Olkiluoto 3 (OL3), taas on tyypiltään painevesireaktori (pressurised water reactor, PWR), jonka suunniteltu tehontuotto on 1600 MW (Teollisuuden Voima Oyj, 2019).

2.1 Kiehausvesireaktorin toimintaperiaate

Kiehausvesilaitoksissa kiertävä vesi toimii samaan aikaan lämpöenergiaa siirtävänä jäähdytteenä sekä neutronien vauhtia hidastavana hidastinaaineena. Vesi kiehuu reaktorin yläosissa uraanipolttoaineen fissiosta vapautuvan lämmön avulla. Fissiossa raskas atomiydin halkeaa kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi vapauttaen suuren määrän energiaa sekä 2–3 neutronia. (Lewis E. 2008, s. 13) Reaktorissa höyrystynyt vesi kulkee höyrynä suoraan turbiinille, jonka korkeapaineosan jälkeen sitä välitulistetaan tuorehöyryllä. Välitulistuksella saadaan kasvatettua jäähdytteen entalpiaa, jolloin polttoaineesta vapautunut energia saadaan mahdollisimman tehokkaasti talteen matalapaineturbiinin siivistön avulla. Turbiinista poistuva lauhtunut höyry jäähdytetään nesteeksi lauhduttimessa, jossa höyrystä siirtyy lämpöä jäähdytysveteen. Lauhduttimelta jäähdyte pumpataan syöttövesipumpulla takaisin kohti reaktoria. Kiehausvesilaitoksen toimintaperiaate esitetään kuvassa 1.



Kuva 1. Olkiluodon kiehutusvesilaitosten yksinkertaistettu toimintaperiaate. (Teollisuuden Voima Oy, 2019)

Ydinreaktorin tehon säätäminen perustuu fissioketjureaktiota ylläpitävän neutronivuon hallitsemiseen. Neutronivuota hallitaan pääasiallisesti säätösauvoilla. Kun säätösauvoja liikutetaan reaktorin sisään polttoaine-elementtien väliin, reaktorin teho laskee neutronien absorboituessa fissiilien uraaniytimien sijasta säätösauvoihin (Eurasto T. et al., s. 31).

2.2 Polttoaine

Polttoaine-elementti koostuu useista kymmenistä metallisuojakuorellisista polttoainesauvoista, jotka sisältävät uraanioksidipellettejä. Kevytvesireaktoreissa käytettävän uraanioksidin uraani koostuu uraanin isotoopeista U-238 ja U-235. U-235 on näistä isotoopeista fissiilimpi, eli se fissioituu jo pienienergisemmän neutronin kohdatessaan. U-238 taas vaatii fissioituaakseen riittävän suuren liike-energian omaavan neutronin. (Eurasto T. et al., s. 27) Koska fissiilimpää isotooppia U-235 esiintyy luonnonuraanissa merkittävästi pienempänä osuutena, polttoainetta on väkevöitävä sen suhteen. Kevytvesireaktoreissa käytettävän ydinpolttoaineen U-235 rikastusaste on yleensä noin 4,5 % (Eurasto T. et al., s. 80). Olkiluodon kiehutusvesilaitoksilla käytettävän polttoaineen U-235-pitoisuus on keskimäärin 3,7–4,1 % (TVO 2017, liite 4 s. 37).

Kiehutusvesilaitoksilla yhtä polttoaine-elementtiä käytetään yleensä neljän käyttöjakson ajan, eli neljä vuotta. Polttoainetta vaihdetaan Olkiluodossa kerran vuodessa, jolloin noin neljännes käytetystä polttoaineesta vaihdetaan uuteen. Polttoainetta voidaan säteilyttää

kiehutusvesireaktoreissa 45 MWd/kgU palamaan asti (Anttila M. 1996). Palama kertoo, kuinka suuren määrän energiaa polttoaine on luovuttanut massayksikköä kohden käyttöikänsä aikana.

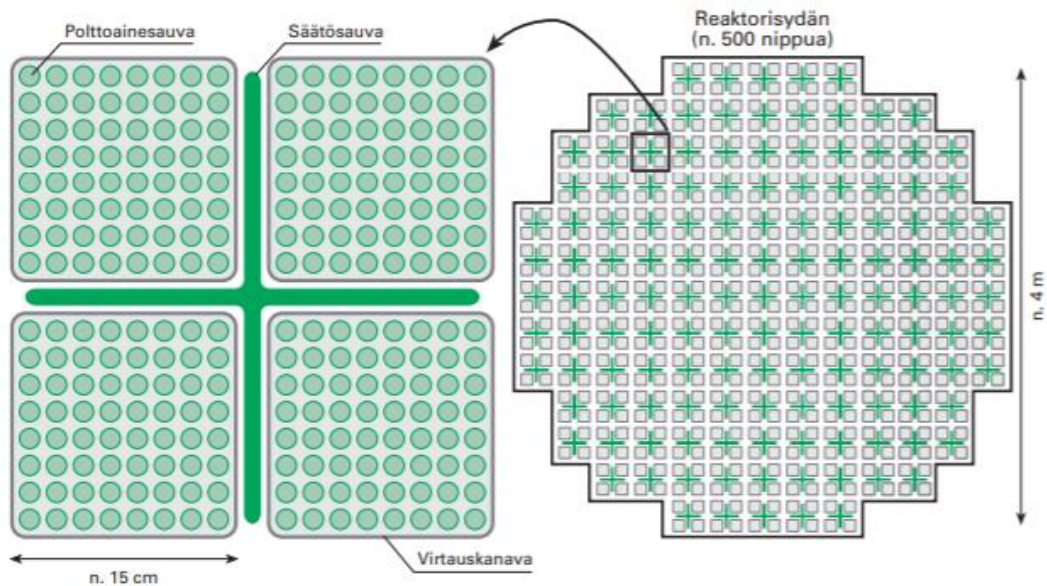
Nykyisin polttoainesauvoja on 10x10 polttoaine-elementin sauvahilassa, mutta aiemmin on ollut käytössä 8x8- ja 9x9- matriisisia elementtejä. Yksittäinen polttoaine-elementti voidaan jakaa sauvojen lisäksi sauvanoodeihin, joita yleensä on 25. Kuvassa 2 esitetään 10x10- polttoaine-elementti.



Kuva 2. GE14-tyyppinen polttoaine-elementti. Polttoainesauvojen väkevyyttä kuvataan eri väreillä. Punainen väri kuvaa suurempaa väkevöintiastetta. (TVO 2019, s.15)

Kuvasta 2 voidaan huomata erilaisia polttoainenipussa olevia nipun tehojakaumaan vaikuttavia tekijöitä. G:llä merkityt sauvat sisältävät gadoliniumia, jota kutsutaan myös palavaksi neutroniabsorbaattoriksi. Absorbaattorin tarkoituksena on pienentää tehojakauman muototekijää sekä kompensoida reaktorin ylijäämäreaktiivisuutta käyttöjaksojen alussa. Väkevöintiasteen vaihtelun tarkoituksena taas on optimoida koko polttoainenipun lämmönsiirtoa. (TVO 2019, s. 15)

Kuvassa 3 esitetään Olkiluodon kiehumusvesilaitoksilla käytettävien polttoaine-elementtien poikkileikkaus aksiaalisuunnassa sekä niiden sijoitus säätösauvan ympärille, jota kuvataan kuvassa tummanvihreällä ristillä.



Kuva 3. Havainnekuva Olkiluodon kiehumusvesireaktorien polttoaine-elementtien poikkileikkauksesta sekä reaktorisydämeistä ylhäältäpäin kuvattuna. (Eurasto T., et. al. 2004, s.51)

3 REAKTORISYDÄMEN MALLINNUS

Ennen uuden käyttöjakson alkamista uuden polttoainelatauksen suunnitteluvaiheessa suoritetaan lukuisia laskelmia, jotka perustuvat esimerkiksi haluttuun tehotasoon. Laskelmat suoritetaan käyttöjakson jokaiselle suunnitellulle ajanhetkelle, jotta voidaan varmistua reaktorisydämen stabiilisuudesta tehonmuutoksien aikana koko käyttöjakson ajan. Suoritettujen mallinnuksien perusteella suunnitellaan tuleva polttoainelataus kunkin polttoaine-elementin optimaalisen käytön mahdollistamiseksi. Polttoainelatauksella tarkoitetaan polttoaine-elementtien keskinäistä järjestystä reaktorissa. Polttoainelatausta suunnitellessa tulee huomioida yksittäisten polttoaine-elementtien kokonaiskäyttöaika reaktorissa. (Paajanen, 2018)

3.1 Mallinnuksen peruseriaatteet

Ydinreaktorin käytössä pyritään tasaiseen tehontuottoon. Tehontuoton ollessa tasaista, Käytännössä tällöin vallitsee hallittu ketjureaktio, jolloin yhdestä fissiosta seuraa yksi uusi fissio vapautuneen neutronin törmätessä seuraavaan fissiiliin uraaniyttimeen. Hallitun ketjureaktion aikaansaaminen vaatii neutronien liikehdinnän sekä siihen vaikuttavien tekijöiden tuntemista.

Neutronit ovat siis oleellinen osa fissioreaktiota sekä hallittua ketjureaktiota. Fissiosta syntyy nopeita neutroneita, joiden liike-energia on noin 2 MeV. Reaktorissa oleva vesi toimii hidastinaaineena. Hidastinaaineessa törmäillessään neutroni menettää liike-energiaansa saavuttaen termisen energiatason. Termisen neutronin liike-energia on jo merkittävästi pienempi, noin 0,025 eV. Termisellä energiatasolla neutroneilla on suurempi todennäköisyys absorboitua U-235-yttimeen aiheuttaen fission. (Eurasto T. et al. 2004, s. 28)

Kaikki fissioissa vapautuvat neutronit eivät kuitenkaan aiheuta uutta fissiota, vaan osa absorboituu joko U-238:aan, säätösauvaan tai reaktorin rakenteisiin. Neutronien määrän muutosta, eli neutronien tuoton ja niiden poistumisen suhdetta kuvaa kasvutekijä k . Kasvutekijän ollessa 1 reaktori on kriittinen, jolloin neutroneita poistuu saman verran, kuin vapautuu. Reaktorin ollessa kriittinen neutronivuo ja reaktorin teho pysyvät vakiona. Kasvutekijän ollessa alle 1, reaktori on alikriittinen, eli neutronien määrä hupenee tuoton

ollessa poistumista pienempi. Kun reaktori on ylikriittinen, kasvutekijä on yli 1. Tällöin neutronien tuotto on suurempaa, kuin niiden poistuma. (Bodansky 2004, s 153)

Kasvutekijä voidaan määrittää teoreettiselle äärettömälle reaktorille, jolloin kyseessä on äärettömän reaktorin kasvutekijä k_{∞} . Todelliselle reaktorille määritetään efektiivinen kasvutekijä k_{eff} , joka esitetään yhtälössä 1. Ainoa ero äärettömän kasvutekijän laskemiseen on neutronien poistuman huomioiva vuotamattomuustekijä P_{nl} , joka huomioi reaktorin dimensiot. (Eurasto et. al. 2004, s. 30)

$$k_{eff} = \varepsilon p f \eta P_{nl} \quad (1)$$

missä	ε	on nopean fission tekijä
	f	on terminen käyttösuhde
	p	on resonanssinvälttämistodennäköisyys
	η	on yhdestä fissiosta syntyvien neutronien lukumäärä
	P_{nl}	on vuodonvälttämättömyystodennäköisyys.

Yhtälössä 1 esitetyt tekijät ovat merkittäviä neutronien määrän kehittymisen kannalta. Nopean fission tekijä ε kuvaa nopeiden neutronien aiheuttamista fissioista seuraavaa neutronien syntyä. Terminen käyttösuhde f kuvaa neutronien määrän suhteellista vähenemistä. Suhdeluku kertoo siis, kuinka moni neutroni absorboituu fissiiliin materiaaliin suhteutettuna kaikkiin absorboituviiin neutroneihin. Resonanssinvälttämistodennäköisyys kuvaa sitä, millä todennäköisyydellä yksittäinen neutroni välttää absorboitumisen U-238-isotooppiin. (Eurasto et. al. 2004, s. 30)

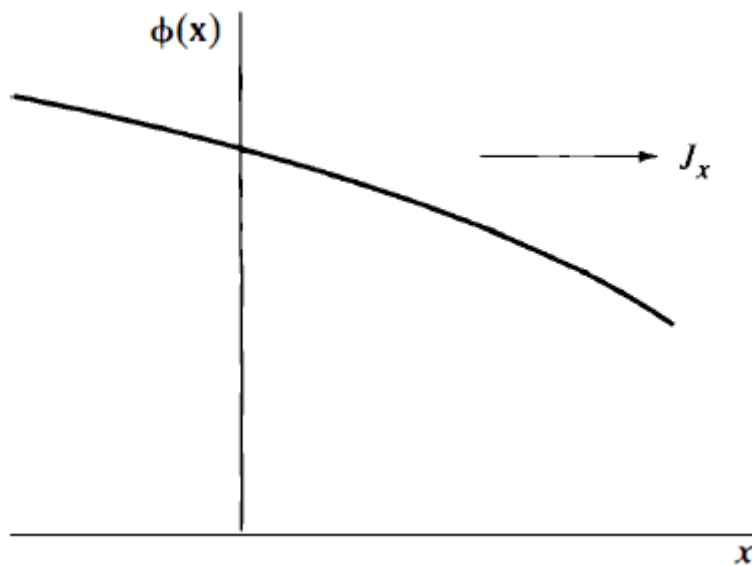
Neutronivuo ϕ kertoo, kuinka monta neutronia kulkee pinta-alayksikön läpi aikayksikköä kohden. Neutronivuo voidaan yksinkertaisessa tapauksessa laskea yhtälöllä 2.

$$\phi = nv \quad (2)$$

missä	n	on neutronitiheys	[1/m ³]
	v	on neutronien nopeus	[m/s].

3.1.1 Fickin laki

Fickin laki diffuusioteorian pohja. Fickin lain mukaan neutronit liikkuvat suuremmasta neutronitiheydestä pienempää kohti kuvan 4 mukaisesti. (Lamarsh 2001, s. 232)



Kuva 4. Neutronivuon ja neutronien virtauksen yhteys.

Kuvasta 4 huomataan, kuinka neutronivuo kohdistuu pienempää neutronien tiheyttä kohti. Neutroneita ei kuitenkaan ohjaa mikään voima, vaan neutroneiden jakauma suuntautuu positiivisen x-akselin suuntaan. Fickin lain yleistä muotoa kuvaa yhtälö 3 (Lamarsh 2001, s. 233).

$$\vec{J} = -D\nabla\phi \quad (3)$$

missä J neutronivirtaaman tiheysvektori

D diffuusiokerroin.

3.1.2 Jatkuvuusyhtälö

Neutronien liikehdintää reaktorissa voidaan mallintaa jatkuvuusyhtälön avulla. Jatkuvuusyhtälössä neutronien määrän muutosnopeutta arvioidaan neutronien tuottonopeuden, niiden absorptioon sekä neutronihäviöiden avulla.

Jatkuvuusyhtälön yleinen muoto esitetään yhtälössä 4. Yhtälön oikean puolen ensimmäinen termi kuvaa neutronien tuotantonopeutta, toinen termi polttoaineeseen absorboitumisesta johtuvia neutronihäviöitä ja kolmas muita neutronihäviöitä. (Lamarsh 2001, s. 237)

$$\frac{\partial n}{\partial t} = s - \Sigma_a \phi - \nabla \bar{J} \quad (4)$$

missä	s	neutronien tuotto
	Σ_a	absorboiva pinta-ala
	J	neutronivuon tiheysvektori

3.1.3 Diffuusioyhtälö

Diffuusioyhtälössä yhdistetään yhtälössä 3 esitetty Fickin laki ja yhtälössä 4 esitetty jatkuvuusyhtälö. Diffuusioyhtälön yleinen muoto esitetään yhtälössä 5 (Lamarsh 2001, s. 237).

$$D\nabla^2 \phi - \Sigma_a \phi + s = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (5)$$

Diffuusioyhtälön yksinkertaistettua muotoa voidaan käyttää reaktorin käyttäytymisen mallintamiseen, sillä neutronien käyttäytymistä tarkemmin kuvaava neutronien kuljetusyhtälö vaatii paljon laskentatehoa, ja on siten melko raskas laskentaohjelmistoille. Neutronien kuljetusyhtälö kuvaa neutronijoukon tilastollisesti arvioitua käyttäytymistä tilavuusyksikössä. (Cacuci D. G. & Hébert A. 2010, s. 753) Yhtälössä voidaan käsitellä neutroneita neutronijoukkoina yksittäisten neutronien sijaan, mikä keventää laskentaa.

3.2 Reaktorisydämen simulointijärjestelmä

Reaktorisydämen simulaattoriohjelmiston tarkoituksena on simuloida reaktorin tilaa tulevan jakson jokaisessa käyttötilanteessa. Simulointitulosten perusteella voidaan arvioida reaktorin stabiilisuutta koko tulevan käyttöjakson ajalta sekä normaalissa

ajotilanteessa että tehonmuutostilanteissa. Olkiluodon kiehutusvesilaitoksilla on käytössä SIMULATE-3 reaktorisydämen simulointiohjelma.

Polttoainesauvojen eri ominaisuudet vaikuttavat koko polttoaine-elementin käyttäytymiseen reaktorissa. Toisin kuin esimerkiksi painevesireaktoreissa, kiehutusvesireaktoreissa käytettävät polttoaine-elementit eivät ole aksiaalisuunnassa täysin muuttumattomia. Kiehutusvesilaitoksille soveltuviissa polttoaine-elementeissä on usein osapitkiä polttoainesauvoja, jolloin geometria ei säily samana jokaisessa elementin osassa. Lisäksi uraanin rikastusaste voi vaihdella sekä polttoaine-elementissä sekä sauvojen välillä että sauvossa aksiaalisuunnasta. Siksi polttoaineen mallintamiseen tarvitaan avuksi Interpin- ohjelma, joka laskee polttoaineen ja moderaattorin lämpötilan sauvakohtaisesti. Lähtötiedoiksi Interpin tarvitsee tietoja polttoaineesta ja polttoainesauvan suojakuoren ulkopuolella vallitsevista olosuhteista. (Paajanen, 2018)

3.3 Mallinnustulosten todentaminen

Reaktorin stabiilisuutta valvotaan käytön aikana erilaisten mittausten ja kriittisyyskokeiden avulla GARDEL- järjestelmässä. Käyttöjakson aikana suoritettavien mittausten perusteella voidaan päätellä, kuinka hyvin reaktorisydämen suunnitteluvaiheessa suoritettavat laskelmat pitävät paikkaansa.

Käyttöjakson alussa polttoaineenvaihdon jälkeen reaktorin ylösajon yhteydessä suoritetaan kylmäkriittisyyskokeet. Kylmäkriittisyyskokeissa tutkitaan, millä kylmän kasvutekijän arvolla reaktori saadaan kriittiseksi (Paajanen, 2018). Samalla saadaan myös varmistettua, kuinka tarkasti ennen polttoainelatausta suoritettavat mallinnukset pitävät paikkaansa.

Reaktorin normaalin käytön aikaisessa tehonvalvonnassa käytetään LPRM (Local Power Range Monitoring) -antureita. LPRM- anturit mittaavat reaktorin eri kohdissa vaikuttavaa neutronivuota reaaliajassa. (NRC, 2011). LPRM- anturit ovat kuitenkin herkkiä esimerkiksi säteilyn vaikutuksille, joten niitä tulee kalibroida useamman kerran käyttöjakson aikana mittaustulosten oikeellisuuden varmistamiseksi. Anturien kalibrointi suoritetaan TIP- järjestelmän (Traversing Incore Probe) avulla noin 6–8 viikon välein.

(NRC, 2011) Kuukausittaisissa mittauksissa mitataan TIP-järjestelmällä reaktorin todellinen tehojakauma, joka asennetaan LPRM-järjestelmään kalibroinnin tuloksena.

4 SYDÄNSIMULAATTORIN LASKENTATARKKUUDEN MÄÄRITTÄMINEN

Polttoainesauvojen tehoprofiilimittauksilla voidaan saada tarkkaa tietoa sauvaan vaikuttavista tehojakaumista polttoaineen palaman avulla. Vuonna 1989 Olkiluodossa suoritettiin tehoprofiilimittaukset yhteensä 59 säteilytetylle polttoainesauvalle, jotka olivat olleet säteilytettävänä reaktorissa yhden käyttöjakson ajan. Mitattavat polttoainesauvat otettiin kahdesta identtisestä polttoaine-elementistä ja pääosin samoista positioista. (Johansson 1992, s. 3) Mitattujen sauvojen sijainteja polttoaine-elementissä havainnollistetaan kuvassa 5.

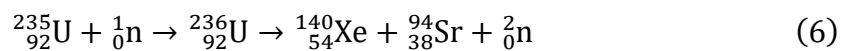
	8	7	6	5	4	3	2	1
H	x	x		x	x		x	x
G		x			x		x	
F	x			x				x
E	x	x			x		x	
D			x		x	x		x
C	x			x				x
B					x			
A	x	x		x	x		x	x

Kuva 5. Tehoprofiilimittauksissa mitatut polttoainesauvat. Sauva D3 mitattiin vain toisesta polttoaine-elementistä.

Tutkimuksen tekeminen aloitettiin simuloimalla mittausajankohtaa edeltävä käyttöjakso SIMULATE-3:lla. Simulointiohjelmaan syötettävään tiedostoon lisättiin komentoja, joilla laskettiin kaikkien reaktorissa olevien polttoaine-elementtien tehojakaumat sekä palamat sauvanoodikohtaisesti. Nämä tiedot kirjoitettiin binääritiedostoon, josta ne luettiin tarkoitukseen soveltuvalla ohjelmalla. Ohjelma vaatii toimiakseen binääritiedoston lisäksi halutun polttoaine-elementin reaktorikoordinaatit, jotka syötettiin ohjelmaan sen pyytäessä niitä. Molempien tutkittavien polttoaine-elementtien tehoprofiilien laskennassa tarvittavien teho- ja palamatietojen hakeminen suoritettiin samalla tavalla.

4.1 Tehoprofiilien laskeminen

Tehoprofiilimittaukset perustuivat erään uraani-235:n hajoamistuotteen, lantaani-140:n aktiivisuuden määrittämiseen polttoaine-elementissä. Aktiivisuuden määrittäminen perustuu lantaani-140:n tuottaman gammasäteilyn mittaamiseen. (Ikonen 2014, s. 3) Uraanin fission tuottama kahdeksi, tässä tutkimuksessa oleelliseksi ytimeksi esitetään yhtälössä 6. Todellisuudessa U-235 voi neutronin kohdatessaan hajeta monella muullakin eri tavalla.



Yhtälössä 6 esitetyssä fissioreaktiossa uraaniydin halkeaa ${}^{140}\text{Xe}$ ja ${}^{94}\text{Sr}$ - ytimiksi. Samalla vapautuu kaksi neutronia.

Polttoaine-elementtien aktiivisuus mittaushetkellä lasketaan La-140 ja Ba-140 isotooppien hajoamisyhtälöiden avulla. Kuten aiemmin kerrottu, palama kertoo, kuinka paljon energiaa polttoaine on vapauttanut käyttökänsä aikana. Mitä enemmän polttoaine on vapauttanut energiaa, sitä enemmän fission tapahtunut ja halkeamistuotteita muodostunut. La-140 määrä on siis riippuvainen palaman suuruudesta.

4.1.1 Ba-140 ja La-140 isotooppien synty

Uraani-235 fission tuottamien seuraavien isotooppien hajoaminen tapahtuu yhtälössä 7 esitetyn radioaktiivisen hajoamisen perusyhtälön mukaisesti.

$$A(t) = \lambda N(t) \quad (7)$$

missä $A(t)$ on aktiivisuus,

λ nuklidin hajoamisvakio ja

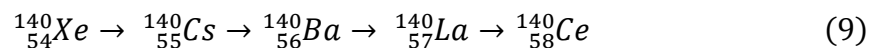
$N(t)$ nuklidien määrä.

Hajoamisvakio määritellään puoliintumisaajan avulla yhtälön 8 mukaisesti. Hajoamisvakio on nuklidikohtainen.

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (8)$$

missä $T_{1/2}$ on puoliintumisaika.

Beetahajoamisessa ydin luovuttaa joko elektronin tai positronin, jolloin alkuaineen järjestysluku muuttuu, eli ydin muuttuu kemiallisesti ajateltuna toiseksi alkuaineeksi. Yhtälössä 9 esitetään U-235:n erään hajoamistuotteen Xe-140:n beetahajoaminen aina stabiiliksi Ce-140 asti.



Yhtälössä 9 esitetyistä isotoopeista Cs-140:lla on minuutin ja Xe-140:lla alle minuutin puoliintumisaika. Puoliintumisajat ovat niin pieniä, että laskennallisesti voidaan ajatella Ba-140 syntyvän suoraan U-235 fission seurauksena.

4.1.2 Lantaanin aktiivisuuden laskeminen

Polttoaine-elementtien aktiivisuutta säteilytyksen aloittamisesta mittaushetkeen asti mallinnetaan yhtälön 10 avulla, joka on johdettu radioaktiivisen hajoamisen perusyhtälöstä.

$$\frac{dB(t)}{dt} = s - \lambda_B B(t) \quad (10)$$

missä $B(t)$ on Ba-140 määrä ajan funktiona,
 s on Ba-140 syntymäärää kuvaava termi ja
 λ_B on Ba-140 hajoamisvakio.

Vastaavasti La-140:n määrää ajan funktiona kuvaa yhtälö 11. Yhtälön ensimmäinen termi kuvaa Ba-140 hajoamista lantaaniksi, ja toinen termi La-140 hajoamista edelleen seuraavaksi alkuaineeksi hajoamisketjussa.

$$\frac{dL(t)}{dt} = \lambda_B B(t) - \lambda_L L(t) \quad (11)$$

missä $L(t)$ on La-140 määrä ajan funktiona ja
 λ_L on La-140 hajoamisvakio.

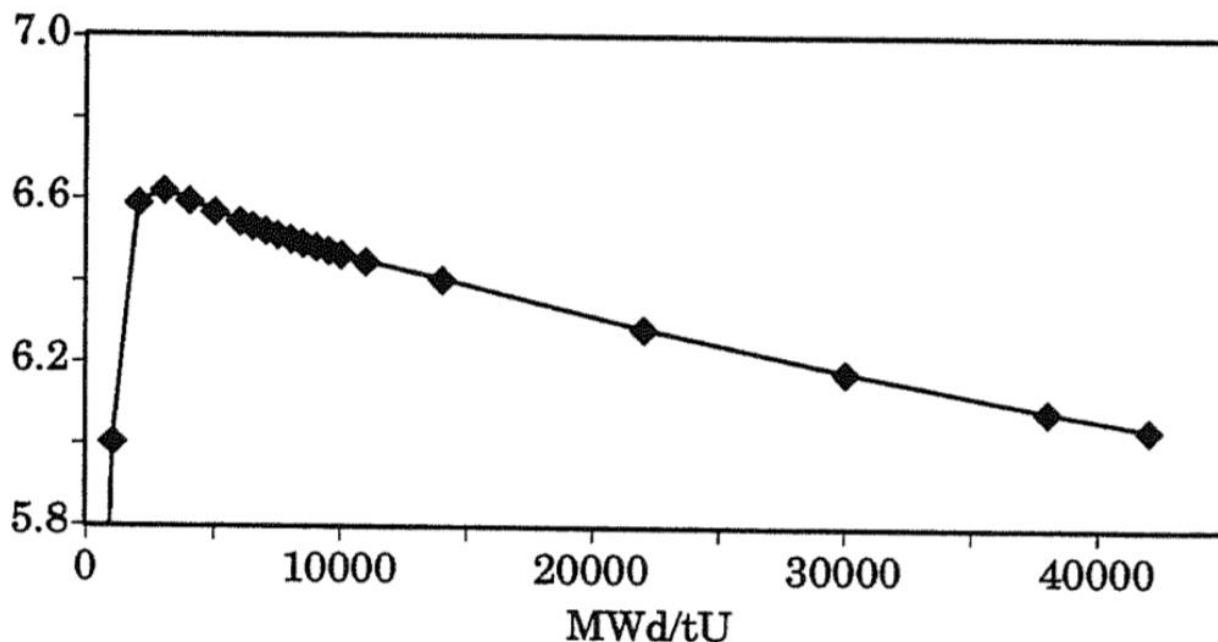
Laskennassa oletetaan, että isotoopin Ba-140 syntymäärä ei pysy aika-askeleen ajan vakiona, vaan se muuttuu lineaarisesti. Lisäksi La-140 ja Ba-140 hajoavat eksponentiaalisesti hajoamisyyhtälön mukaan. Siksi differentiaaliyhtälön ratkaisussa on huomioitu sekä lineaarinen että eksponentiaalinen osuus, jolloin saadaan yhtälöt 12 ja 13. Yhtälöllä 12 lasketaan Ba-140 määrää ja yhtälöllä 13 La-140 määrää.

$$B(t) = B_0 e^{-\lambda_B \Delta t} + \frac{1}{\lambda_B} \left(s_1 - \frac{s_2}{\lambda_B} \right) (1 - e^{-\lambda_B \Delta t}) + \frac{s_2}{\lambda_B} \Delta t \quad (12)$$

$$L(t) = L_0 e^{-\lambda_L \Delta t} + \frac{1}{\lambda_L} \left(s_1 - \frac{s_2}{\lambda_B} - \frac{s_2}{\lambda_B} \right) (1 - e^{-\lambda_L \Delta t}) + \frac{\lambda_B^2 B_0 - s_1 \lambda_B + s_2}{\lambda_L \lambda_B - \lambda_B^2} (e^{-\lambda_B \Delta t} - e^{-\lambda_L \Delta t}) + \frac{s_2}{\lambda_L} \Delta t \quad (13)$$

- missä
- Δt on ajanmuutos tunteina,
 - B_0 on Ba-140 määrä aika-askeleen alussa,
 - L_0 on La-140 määrä aika-askeleen alussa,
 - s_1 on bariumin syntymäärä aika-askeleen alussa ja
 - s_2 on syntymäärän muutos aika-askeleen aikana.

Bariumin syntyminen hajoamisketjusta on riippuvainen polttoaineen palamasta kuvan 6 osoittamalla tavalla, jossa kuvataan Ba-140 saantoa palaman funktiona.



Kuva 6. Ba-140 muodostumisen riippuvuus palamasta (Johansson 1992, s. 8). Kuvassa x-akselilla on polttoaineen palama, ja y-akselilla Ba-140 saanto.

Kuvasta poimittiin riittävä määrä datapisteitä tekstitiedostoon laskennan suoritusta varten tarpeellisella palama-alueella. Ba-140 saantotietoja tarvitaan syntymäärän laskemiseen kullakin ajanhetkellä. Laskennan suorittamista varten Ba-140 syntytermit halutuille tehonhetkille laskettiin lineaarisesti interpoloimalla.

Bariumin saanto Y on tässä tutkimuksessa oletettu muuttuvan lineaarisesti yhden aika-askelen aikana, jolloin s_1 on bariumin saanto aika-askelen alussa, ja s_2 saannon muutos aika-askelen aikana. Koska Ba-140 saanto on vahvasti riippuvainen polttoaineen palamasta ja palaman suuruus on suoraan verrannollinen reaktorissa vallitsevan tehon suuruuteen, reaktorin lineaariteho on huomioitava laskuja suoritettaessa. Lineaaritehon suuruus saatiin sydänsimulaattoriohjelmistolla suoritettujen simulaation tuloksista.

Ba-140 isotoopin syntyvauhti aika-askelen alussa lasketaan yhtälöllä 14.

$$s_1 = Y(Bu)P_{lin} \quad (14)$$

missä $Y(BU)$ on ba-140 saanto palaman funktiona ja

P_{lin} on lineaariteho.

Saannon muutos taas lasketaan yhtälöllä 15.

$$s_2 = \frac{1}{\Delta t} (Y(BU_2)P_{lin} - Y(BU_1)P_{lin}) \quad (15)$$

missä Δt on ajanmuutos aika-asteleiden välillä.

Reaktorin lineaariteho kullakin ajanhetkellä lasketaan yhtälöllä 16.

$$P_{lin} = P_{th}P_m \quad (16)$$

missä P_{th} on reaktorin termien teho ja
 P_m on sauvanoodissa vaikuttavan tehon muotokerroin.

Reaktorin termiselle teholle haetaan arvot simuloinnista seuranneesta tulostiedostosta. Samasta tiedostosta haetaan myös reaktorin tehon prosentuaaliset arvot sekä täystehotunnit (EFPH). Tehoprosenttien ja täystehotuntien avulla lasketaan aika-asteleiden välissä todellisuudessa kulunut aika, jolla lasketaan haluttujen isotooppien aktiivisuutta. Todellisuudessa kulunut aika saadaan jakamalla täystehotunti vastaavalla tehoprosentilla:

$$t = \frac{t_{EFPH}}{P} \quad (17)$$

missä t_{EFPH} aika täystehotunteina ja
 P reaktorin teho prosentteina vastaavalla hetkellä.

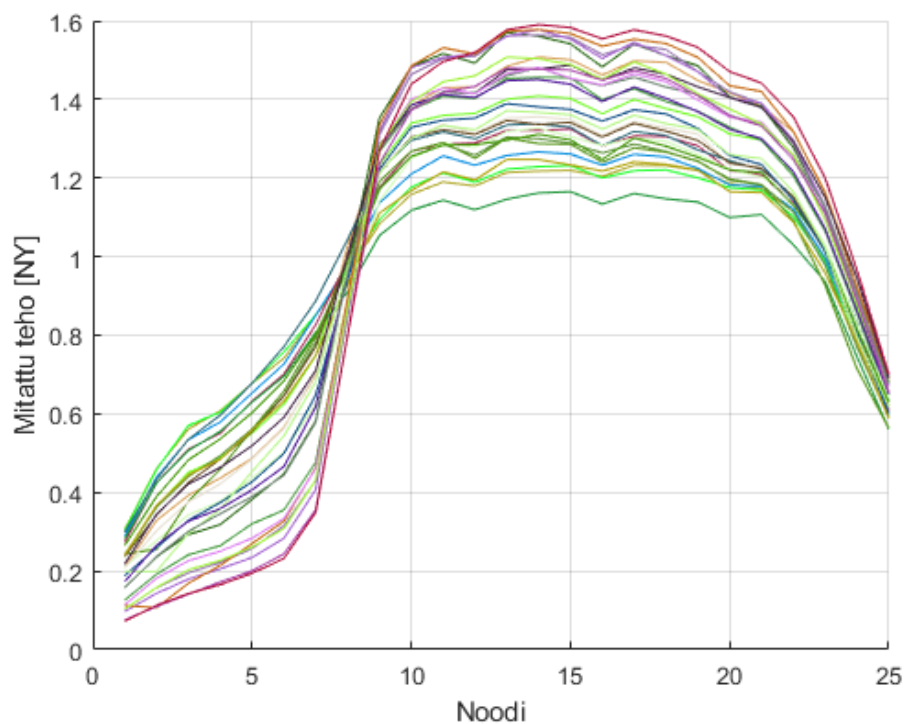
Simulointituloksista saatuja laskentatuloksia verrataan laitoksilla aiemmin tehtyjen tehoprofiilimittauksien tuloksiin. Tehoprofiilimittaukset suoritettiin kuitenkin vasta kolme kuukautta käyttöjakson loppumisen jälkeen. Näiden kolmen kuukauden aikana laskennassa hyödynnettävät lantaanin ja bariumin isotoopit jatkoivat hajoamistaan hajoamisyhtälöiden mukaisesti. Säteililyksen loputtua voidaan olettaa, ettei Ba-140 isotooppia synny lisää, koska reaktoriin sisäänvedetyt säätösauvat absorboivat vapaat neutronit estäen polttoaineen fission. La-140 isotooppia syntyy kuitenkin jatkuvasti lisää hajoavista Ba-140- ytimistä. Laskentatulosten korjaus mittaushetkeen tapahtuu laskemalla La-140 ja Ba-140 isotooppien määrät kolmen kuukauden päähän säteililyksen loppumisesta yhtälöillä 12 ja 13, mutta tällä kertaa syntymistä kuvastavat termit s_1 ja s_2 asetetaan nolliksi.

5 TULOKSET

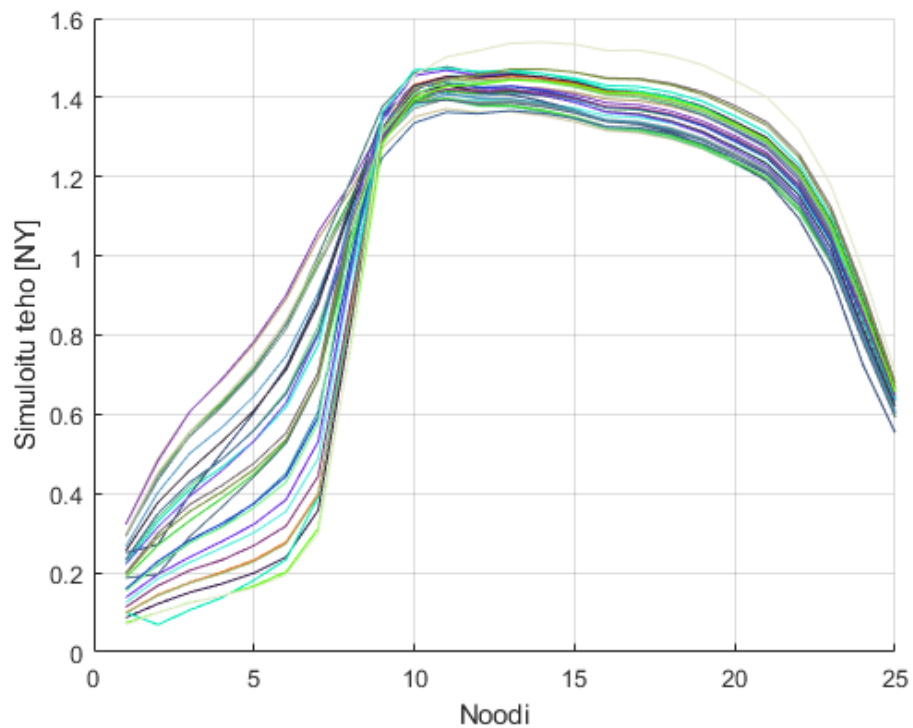
Tutkittavista polttoaine-elementeistä käytetään jatkossa numerointia 1 ja 2, missä 1 viittaa ensimmäiseen elementtiin, josta mitattiin 29 polttoainesauvaa, ja 2 viittaa toiseen elementtiin, josta mitattiin 30 sauvaa. Polttoaine-elementtien tehojakaumat näyttävät melko samanmuotoisilta, kun verrataan simuloituilla arvoilla ja mitatuilla arvoilla piirrettyjä kuvaajia. Mitattujen arvojen perusteella piirretyt kuvaajat ovat kuitenkin odotetusti yksityiskohtaisempia. Kuvaajissa esitetään eri sauvoja eri väreillä.

Polttoaine-elementtien tehojen arvot normeerattiin mitattujen ja simuloitujen tuloksien vertailun mahdolliseksi. Nyt normeeraus tapahtui siten, että polttoaine-elementin sisäisesti normeerattujen arvojen keskiarvoksi saadaan yksi. Tehon yksikkönä käytetään tulevissa kuvaajissa mielivaltaista yksikköä, joka on tässä työssä NY (normeerattu yksikkö)

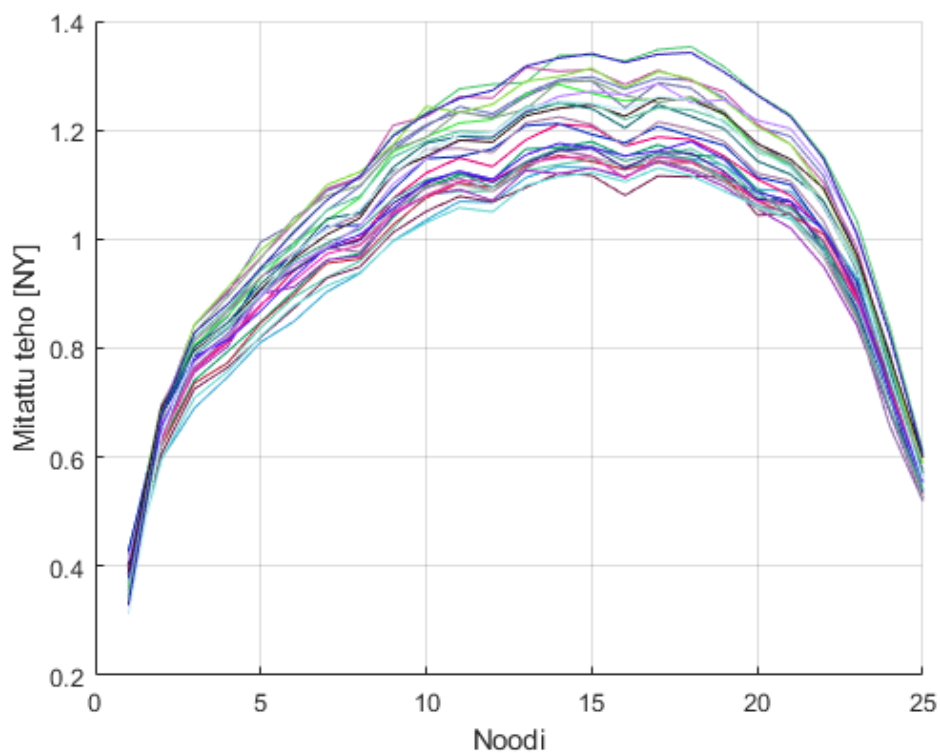
Polttoaine-elementtien tehoprofiilit esitetään kuvissa 7–10. Kuvissa 7 ja 8 esitetään elementin 1 tehoprofiilit ja kuvissa 9–10 elementin 2 tehoprofiilit. Tutkittavat elementit ovat ydinreaktiivisilta ominaisuuksiltaan sekä geometrialtaan keskenään identtisiä, mutta ne sijaitsivat mittauksia edeltävän käyttöjakson ajan reaktorin eri osissa ja eri säätösauvojen ajoryhmissä. Elementin 1 vieressä oli lähempänä käyttöjakson loppua säätösauva vedettynä osittain sisään, jolloin suuri osa vapaista neutroneista absorboitui säätösauvaan sen vaikutusalueella, eli elementin alaosassa, noodeissa 1–7 (Ikonen 2014. s. 19). Säätösauvan vaikutuksen polttoainesauvojen tehojakaumiin voi huomata kuvista 7 ja 8, kun sauvanoodeissa 1–7 vaikuttava teho on merkittävästi alhaisempi, kuin korkeammalla polttoaine-elementissä. Elementti 2 taas sijaitsi sellaisessa säätösauvojen ajoryhmässä, joka oli koko käyttöjakson ajan reaktorista ulosvedettynä, eli säätösauva ei päässyt absorboimaan polttoaine-elementtiä lähestyviä vapaita neutroneita.



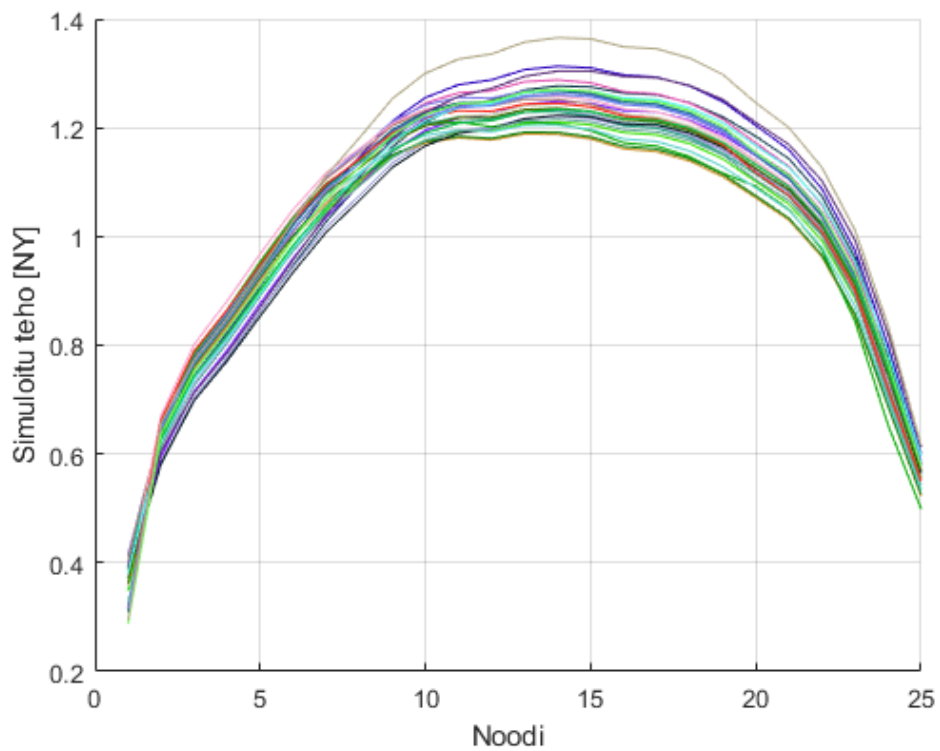
Kuva 7. Elementin 1 aksiaalinen tehojakauma mitatuilla tehon arvoilla. Kuvassa yksittäin piirretyt kuvaajat esittävät yksittäisten sauvojen tehojakaumia.



Kuva 8. Elementin 1 aksiaalinen tehojakauma simuloituilla tehon arvoilla. Kuvassa yksittäin piirretyt kuvaajat esittävät yksittäisten sauvojen tehojakaumia.



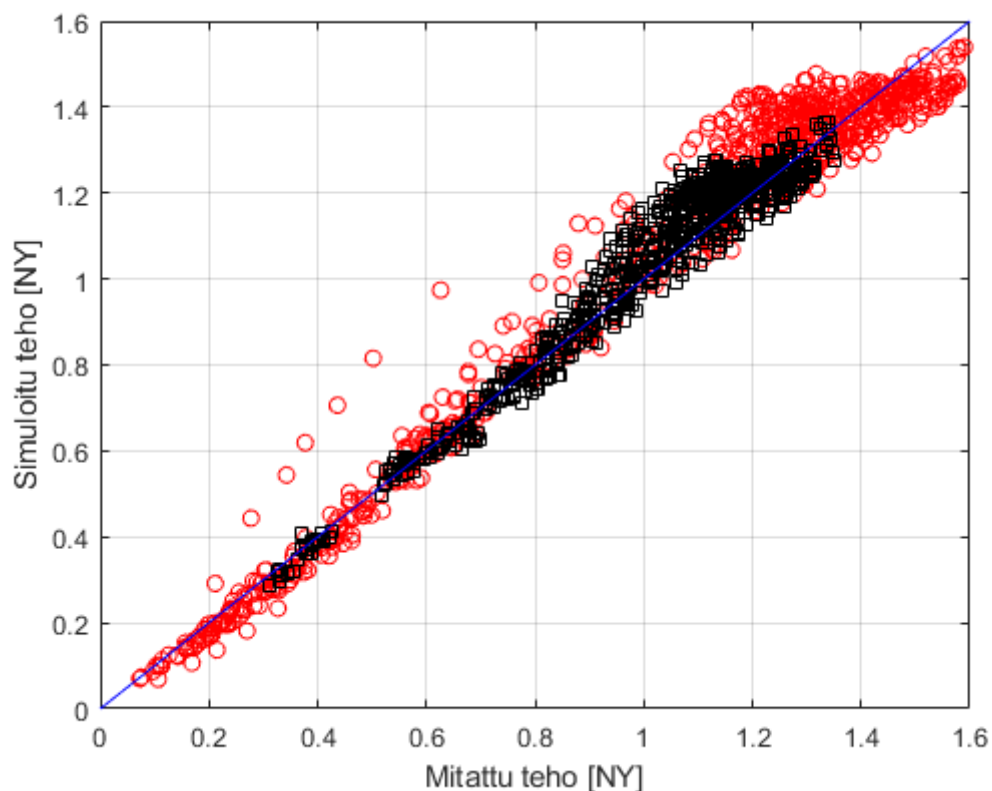
Kuva 9. Elementin 2 aksiaalinen tehojakauma mittaustulosten perusteella sauvanoodeittain. Kuvassa yksittäin piirretyt kuvaajat esittävät yksittäisten sauvojen tehojakaumia.



Kuva 10. Elementin 2 aksiaalinen tehojakauma simulointitulosten perusteella sauvanoodeittain. Kuvassa yksittäin piirretyt kuvaajat esittävät yksittäisten sauvojen tehojakaumia.

Tehojakaumien kuvaajista huomataan, että simulaattoriohjelmiston laskemilla arvoilla eri sauvojen väliset tehot eivät jakaudu niin laajalle alueelle, kuin mitattujen arvojen perusteella kuuluisi. Lisäksi elementissä 1 on selkeästi yksi polttoainesauva, jonka tehojakauma poikkeaa merkittävästi muista sauvoista. Mitattujen ja simuloitujen arvojen kuvaajat kuitenkin vastaavat muodoltaan toisiaan, joten simuloitujen arvojen perusteella suoritettujen laskujen tulokset voidaan olettaa oikeiksi.

Mitattujen ja simuloitujen arvojen kuuluisi olla teoriassa samoja, mutta todellisuudessa nykyinen simulaattoriohjelmisto ei kykene täydelliseen tarkkuuteen. Lisäksi on hyvä huomioida, että myös sauvamittauksissa voi olla virhettä. Kuvassa 11 on piirretty samaan kuvaajaan jokainen sauvanoodi siten, että mitattujen ja simuloitujen arvojen suhde osuisi ideaalitulanteessa siniselle viivalle.



Kuva 11. Simuloitujen ja mitattujen arvojen suhteutus. Punaisella kuvataan elementtiä 1 ja mustalla elementtiä 2.

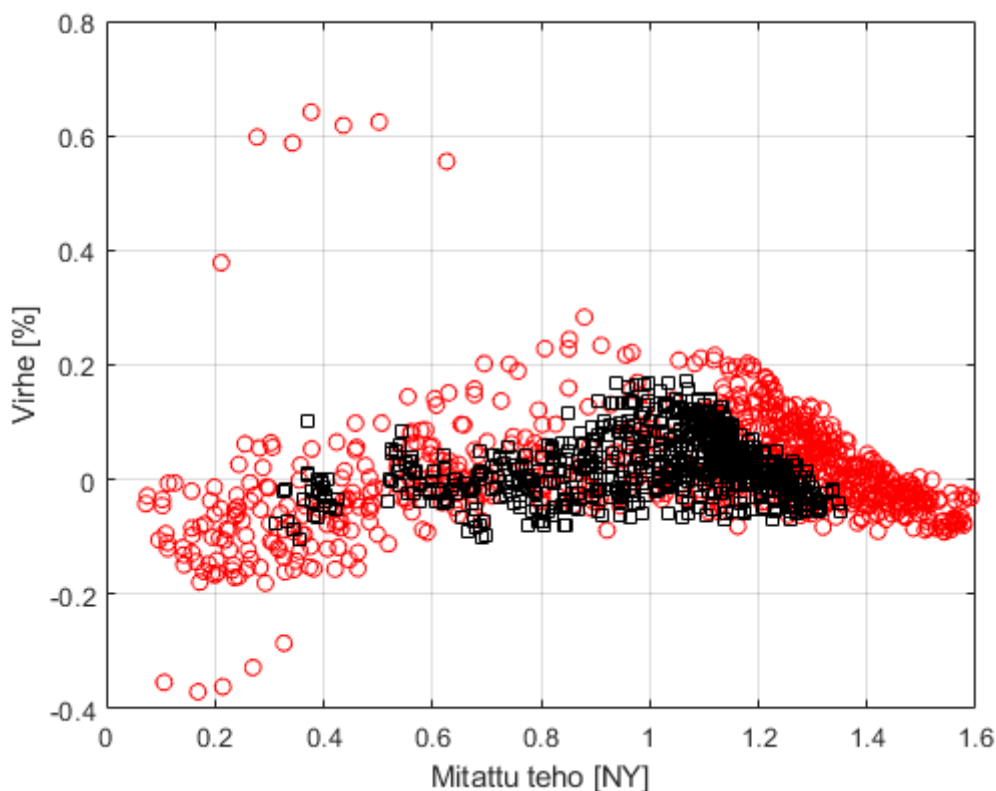
Kuvasta 11 huomataan, että simuloitua arvoja ja mitattuja arvoja osuvat melko hyvin siniselle viivalle, vaikka hajontaakin on havaittavissa. Varsinkin suuremmilla tehoilla laskettaessa laskentatarkkuus vaikuttaa huononevan. Elementin 1 arvoissa on kuvan 11 perusteella enemmän hajontaa, kuin elementin 2.

5.1 Virheen arviointi

Suhteellisen virheen avulla voidaan arvioida sydänsimulaattorin laskentatarkkuutta. Suhteellisen virheen avulla saadaan virhe prosenteiksi. Suhteellinen virhe lasketaan yhtälöllä 18 kummallekin tutkittavalle elementille ja jokaiselle sauvanoodille erikseen.

$$E_{rel} = \frac{P_s - P_m}{P_m} \cdot 100\% \quad (18)$$

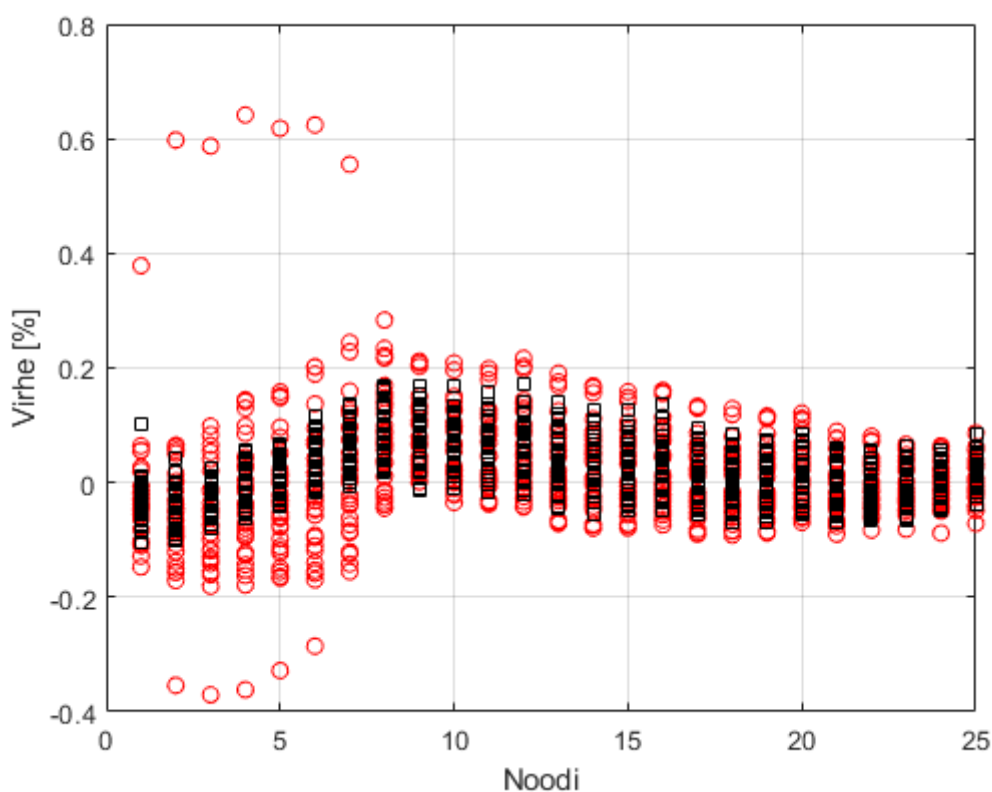
Yhtälöllä 18 lasketut kaikkien sauvanoodien suhteellisen virheen arvot mitatun tehon funktiona esitetään kuvassa 12.



Kuva 12. Suhteellinen virhe mitatun tehon funktiona. Punaisella kuvataan elementtiä 1 ja mustalla elementtiä 2.

Kuvan 12 perusteella eniten virhettä vaikuttaa syntyvän suuremman tehon vaikutusalueella olevissa sauvanoodeissa. Pienemmällä teholla laskentatarkkuus vaikuttaa pysyvän parempana. Yksittäiset suuresti poikkeavat virheen arvot liittyvät mahdollisesti poikkeavan suuren virheen omaaviin kahteen sauvaan.

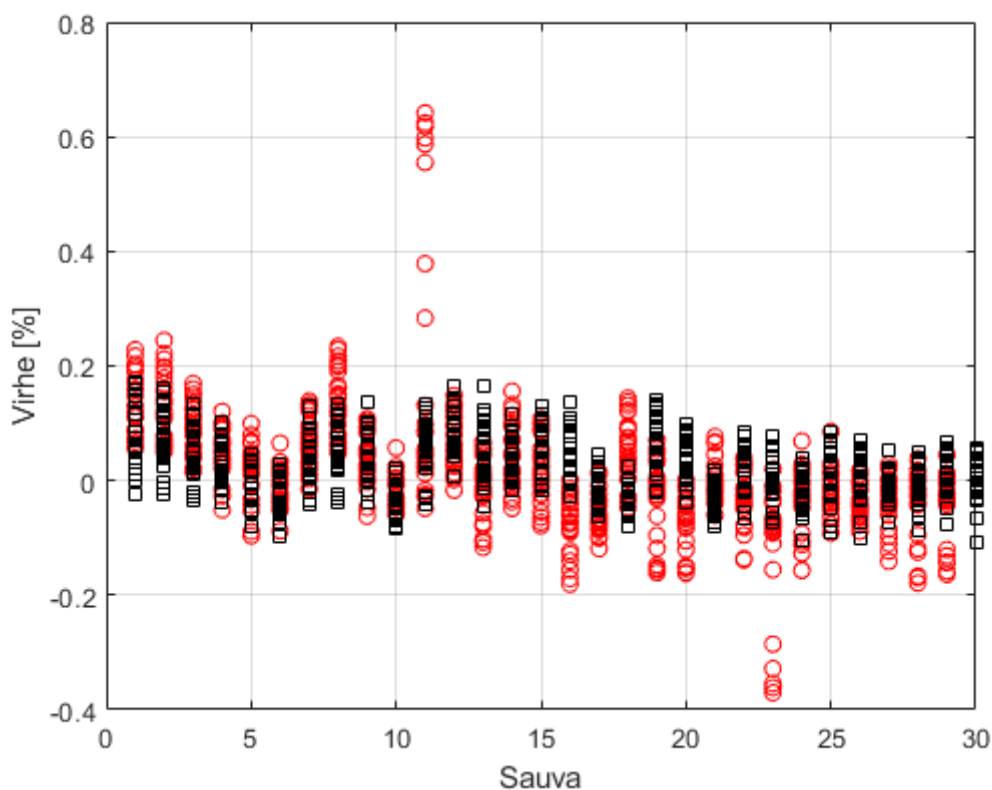
Edellä tutkittiin, kuinka sauvanoodin teho vaikuttaa virheen suuruuteen reaktorin tehon funktiona. Kuvassa 13 esitetään virheen suuruus noodeittain ja kuvassa 14 sauvoittain.



Kuva 13. Suhteelliset virheet sauvanoodeittain. Punaisella kuvataan elementtiä 1 ja mustalla elementtiä 2.

Kuvasta 13 huomataan, että elementin 1 tehojakaumia simuloitaessa virhettä syntyy kumpaankin suuntaan merkittävästi noodeissa 1–7, mutta virheen suuruus ja hajonta pienenee siirryttäessä korkeammalle polttoaine-elementissä. Kuvasta 13 voidaan huomata myös, kuinka virheen hajonta on suurempaa elementissä 1, erityisesti elementin alaosassa, joka oli säätösauvan vaikutusalueella. Elementin 2 virhejakauma on huomattavasti suppeampi ja tasaisempi.

Kuvassa 15 esitetään lasketut suhteelliset virheet sauvoittain.



Kuva 14. Suhteelliset virheet esitettyä sauvoittain.

Kuvassa 14 erottuu kaksi polttoainesauvaa elementistä 1, joissa teho on merkittävästi joko yli- tai aliarvioitu. Ilmiö voi johtua esimerkiksi mittausvirheestä. Toisaalta sydänsimulaattoriohjelmiston laskentakoodi voi jostain ydinteknisestä syystä antaa poikkeavia tuloksia kyseisellä alueella.

Kuvissa 15 ja 16 esitetään jokaiselle sauvalla lasketut absoluuttisten virheiden keskiarvot 8x8-sauvamatriisissa kummallekin polttoaine-elementille erikseen. Negatiivinen keskiarvo kuvastaa simuloinnissa tapahtunutta tehojakauman aliarvioimista ja positiivinen keskiarvo kuvastaa taas tehon yliarvioimista. Kuviin on merkitty punaisella yli 5 % yliarvioitua sauvia ja vihreällä yli 5 % aliarvioitua sauvia.

H	-0,0237	-0,023		-0,0307	-0,0356		-0,0174	-0,0204
G		-0,0795			-0,0204		0,0053	
F	-0,0591			-0,0075				0,0674
E	-0,0563	-0,066			0,0307		0,0595	
D			0,0017		0,067			0,1067
C	-0,0258			0,0387				0,1342
B					0,0782			
A	-0,0145	0,0333		0,0576	0,0984		0,1362	0,1385
	8	7	6	5	4	3	2	1

Kuva 15. Elementin 1 yksittäisten sauvojen suhteellisen virheen keskiarvo esitettynä kullekin mitatulle sauvalle.

H	0,0122	0,0125		0,0033	-0,0759		0,007	0,0148
G		-0,0241			0,0113		0,0244	
F	-0,0296			0,0325				0,0693
E	-0,0347	-0,0132			0,0512		0,0628	
D			0,0335		0,0477	0,08		0,0652
C	-0,0429			0,042				0,0652
B					0,0448			
A	-0,028	-0,0098		0,0255	0,0467		0,0784	0,0942
	8	7	6	5	4	3	2	1

Kuva 16. Elementin 2 yksittäisten sauvojen suhteellisen virheen keskiarvo esitettynä kullekin mitatulle sauvalle.

Kuvien 15 ja 16 perusteella kummallekin elementille vaikuttaa olevan yhteistä se, että sauvoissa vaikuttavan tehon suuruus on aliarvioitu pääosin säätösauvan sisänurkassa. Tehon yliarviointia taas vaikuttaa tapahtuvan eniten sauvan A1 läheisyydessä, eli kaukana säätösauvasta. Lisäksi simulaattoriohjelmisto vaikuttaa laskevan elementin 1 tehoprofiilin kokonaisuudessaan tarkemmin, kuin elementin 2. Elementin 1 virheen keskiarvo on 2,6 % ja elementin 2 keskiarvo on 2,9 %.

5.2 Johtopäätökset

Polttoaine-elementit olivat geometrialtaan identtisiä, mutta käyttöjakson ajan ne olivat eri säätösauvojen ajoryhmissä ja reaktorin eri alueilla. Voidaan siis olettaa, että eroavaisuudet tehojakaumien laskentatarkkuudessa johtuvat ainakin säätösauvan vuorovaikutuksesta sekä eroavien sijaintien vaikutuksesta lineaaritehoon.

Sydänsimulaattoriohjelmiston laskenta vaikuttaa kuvien 15 ja 16 perusteella olevan tarkimmillaan polttoainenipun keskimmäisten sauvojen kohdilla. Suurinta epätarkkuutta esiintyy molemmissa tutkittavissa elementeissä erityisesti kaukana säätösauvasta sauvan H8 läheisyydessä. Liitteiden 1 ja 2 kuvista voidaan huomata, kuinka suuria eroja yksittäisien sauvojen tehojakaumien laskennassa on.

Tätä tutkimusta ei kuitenkaan voida pitää absoluuttisena totuutena. Inhimillisen virheen mahdollisuutta ei voida poissulkea tutkimuksen mistään vaiheesta mittauksien suorituksesta mittaus- ja laskentatulosten vertailuun asti. Mittalaitteiden tarkkuus voi olla erilaista nykyään, kuin mittausten suoritusajankohtana 1970-luvulla. Mikäli tutkimus toistettaisiin uudemmilla mittaustuloksilla, tulokset voisivat olla erilaisia.

Lisäksi tutkimuksen otanta oli melko pieni. Reaktorisydämessä on yhteensä 500 polttoaine-elementtiä, joista kahdesta mitattiin yhteensä muutamia kymmeniä sauvoja. Kaikkien reaktorissa olleiden polttoainesauvojen mittaaminen olisi kuitenkin jo melko hyödytöntä, koska jo pienemmällä otannalla voidaan saada luotettavia arvioita sydänsimulaattoriohjelmiston laskentatarkkuudesta.

6 YHTEENVETO

Reaktorisydämen suunnittelu- ja laskentavaiheessa tehdään yksinkertaistuksia ja olettamuksia monimutkaisten asioiden yksinkertaistamiseksi. Suuremmassa, koko reaktorin mittakaavassa näillä yksinkertaistuksilla ei ole suurta merkitystä kriittisyysturvallisuudelle. Yksinkertaistusten merkityksestä polttoaine-elementtien tehoprofiilien laskentatarkkuuteen sauvanooditasolla ei kuitenkaan ole kovin paljoa tietoa. Tässä työssä tutkittiin sydänsimulaattoriohjelmiston laskentatarkkuutta sauvanooditasolla vertaamalla simuloituja arvoja aiempiin mitattuihin arvoihin.

Olkiluodon ydinvoimalaitoksella suoritettiin vuonna 1989 tehoprofiilimittaukset 59 polttoainesauvalle, jotka otettiin kahdesta identtisestä polttoaine-elementistä. Elementit olivat olleet reaktorissa säteilytettävänä yhden käyttöjakson ajan, jolloin ne sijaitsivat eri säätösauvojen ajoryhmissä. Mittauksissa mitattiin polttoainesauvojen aksiaaliset tehojakaumat sauvanoodeittain polttoaineen palamasta riippuvaisen ^{140}La aktiivisuuden avulla.

Sydänsimulaattoriohjelmiston laskentatarkkuuden määrittämiseksi mitattuja tehoprofiileja verrattiin ohjelmiston mallintamiin tehoprofiileihin. Tutkimusta varten simuloitiin mittauksia edeltävä käyttöjakso SIMULATE-3- simulaattoriohjelmistolla. Ohjelmiston simuloimien teho- ja palamatietojen avulla laskettiin Ba-140 ja La-140 isotoopeille aktiivisuudet. Laskenta pohjautui tutkittavien isotooppien hajoamisyyhtälöiden avulla muodostettuihin differentiaaliyhtälöihin. Jokaiselle sauvalle ja sauvanoodille lasketut La-140 aktiivisuudet normeerattiin samaan muotoon mittaustulosten kanssa, jotta mittaus- ja laskentatuloksia voitiin verrata luotettavasti.

Tulokseksi saatiin viittauksia siitä, kuinka simulaattoriohjelmiston laskenta on riippuvainen polttoainesauvan ja sauvanoodin sijainnista säätösauvasta. Tuloksista huomattiin, kuinka sydänsimulaattori yliarvioi mittaustuloksiin verrattuna sauvoissa vaikuttavan tehon kauempana säätösauvan sisänurkasta. Sisänurkassa simulaattori taas aliarvioi tehon suuruutta. Sauvatasolla simulaattorin laskentatarkkuus on siis parhaimmillaan sauvan ollessa elementin keskivaiheilla.

LÄHDELUETTELO

Anttila Markku. 1996. Gamma and neutron dose rates on the outer surface of the nuclear waste disposal canisters. Posiva. Posiva-96-10. Saatavissa: http://posiva.fi/files/2636/POSIVA-96-10_web.pdf

Bodansky, David. 2003. Nuclear energy: principles, practises and prospects. 2. painos. Yhdysvallat: Springer-Verlag. [Viitattu 11.9.2020]. Saatavissa: <https://link-springer-com.ezproxy.cc.lut.fi/content/pdf/10.1007%2Fb138326.pdf>

Cacuci, D. G. & Hébert A. 2010. Handbook of Nuclear Engineering. 1. painos. Yhdysvallat: Springer. 3538 sivua. ISBN 978-0-387-98130-7.

Chechev, V. P., Kuzmenko, N. K., 2016. Nuclear Decay Data for the International Reactor Dosimetry for Fission and Fusion (IRDFF): Updated Evaluations of the Half-Lives and Gamma Ray Intensities. [Verkkosivu]. [Viitattu 25.1.2020]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/293011876_Nuclear_Decay_Data_for_the_International_Reactor_Dosimetry_Library_for_Fission_and_Fusion_IRDFF_Updated_Evaluations_of_the_Half-Lives_and_Gamma_Ray_Intensities

Eurasto Tapio, Hyvärinen Juhani, et. al, 2004. Ydinvoimalaitostekniikan perusteita. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 11.9.2020]. Saatavissa: https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/kirjasarjaV_ydinturvallisuus_2.pdf/74b3643c-419f-4381-89ff-423e406f98b1

Ikonen Tomi. 2014. Evaluation of the accuracy of the assembly power distribution calculated by SIMULATE-3. Espoo: VTT. Raportti VTT-CR-02273-14. Julkaisematon.

Johansson J-O. 1992. Evaluation of Gamma Scan of Fuel Assemblies in TVO II NPS after the 1989 Annual Shutdown. ABB Atom. Raportti BR 92-725E. Julkaisematon.

Kettunen Tiina. 2014. Reaktorin stabiilisuuden valvonta Gardel- järjestelmässä. Eurajoki: Teollisuuden Voima Oyj. Muistio 158326. Julkaisematon.

Lamarsh John R. & Baratta Anthony J. 2001. Introduction to Nuclear Engineering. 3. painos. Yhdysvallat. 783 sivua. ISBN 0-201-82498-1. [Viitattu 11.9.2020].

Moilanen Atte, 2017. Menettelytapa- INTERPIN. Eurajoki: Teollisuuden Voima Oyj. Menettelytapa 170064. Julkaisematon.

Paajanen Matti, 2018. Keskustelut 14.5.-1.8.2018.

Teollisuuden Voima Oyj (TVO), 2020. Olkiluoto 1- laitousyksiköllä historian paras tuotantovuosi. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 26.1.2020]. Saatavissa: <https://www.tvo.fi/news/2168>

Teollisuuden voima Oyj (TVO), 2019. [Teollisuuden voima Oyj:n verkkosivut]. [Viitattu 12.09.2019]. Saatavissa: <https://www.tvo.fi/>

Teollisuuden voima Oyj (TVO), 2019. [Teollisuuden voima Oyj:n esite]. [Viitattu 26.03.2019]. Saatavissa: <https://www.tvo.fi/uploads/File/yksikot-OL1-OL2.pdf>

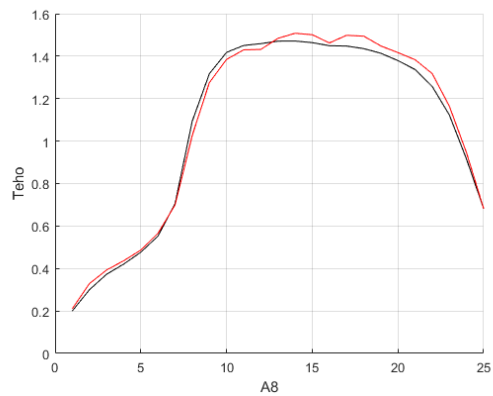
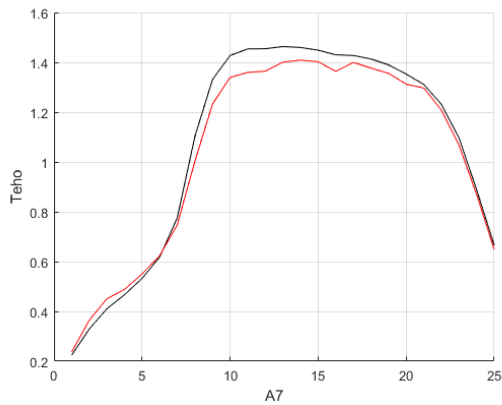
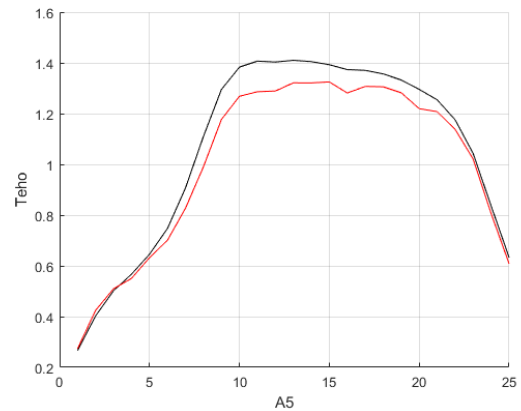
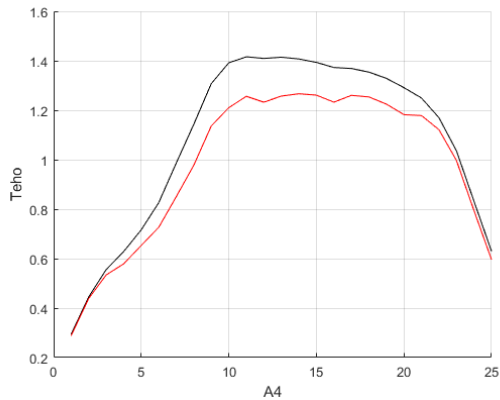
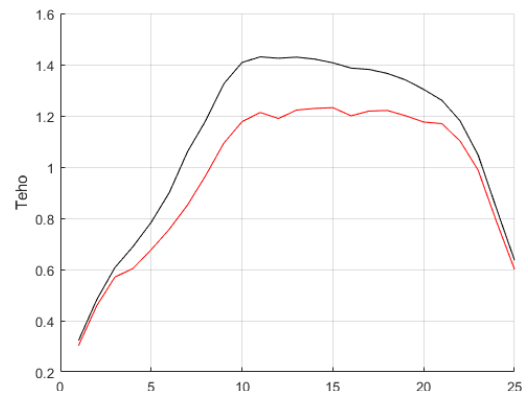
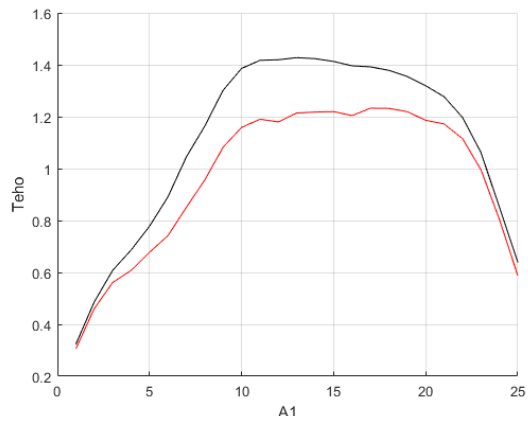
Teollisuuden voima Oyj (TVO), 2017. Olkiluoto 1- ja 2- ydinvoimalaitosyksiköiden käyttöluvhakemus. [Teollisuuden voima Oyj:n julkaisu]. [Viitattu 2.12.2020]. Saatavissa: <https://www.tvo.fi/uploads/julkaisut/tiedostot/OL1%20ja%20OL2%20-laitosyksik%C3%B6iden%20k%C3%A4ytt%C3%B6luvhakemus.pdf>

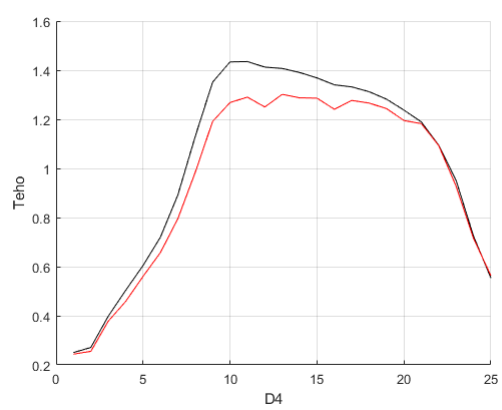
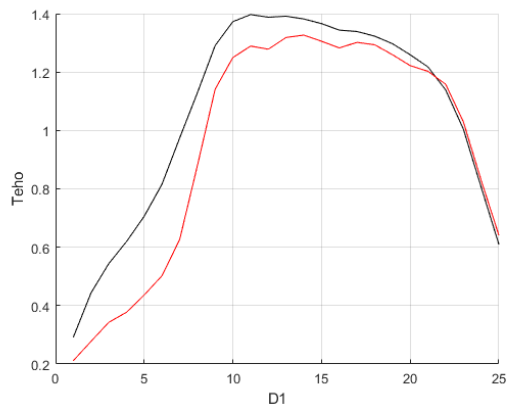
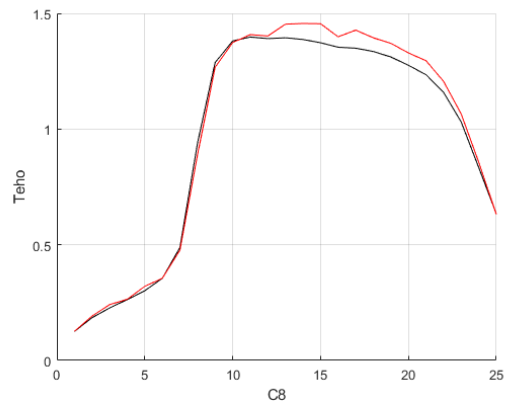
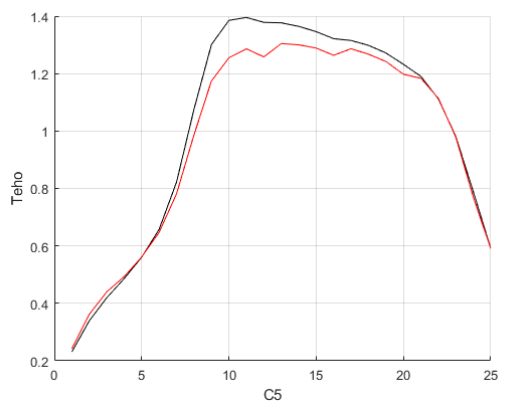
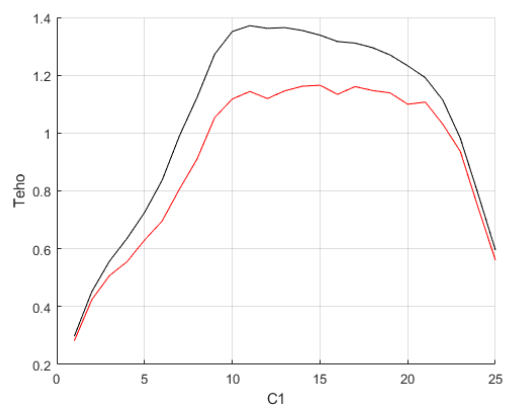
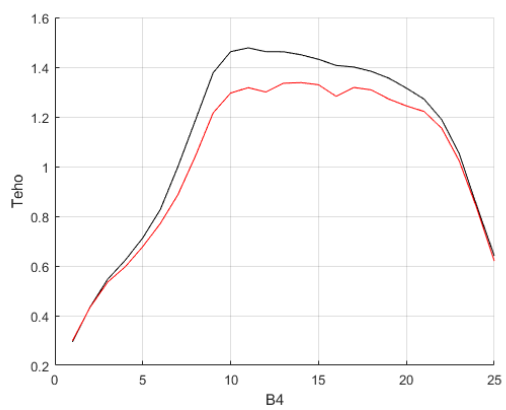
Tilastokeskus, 2019. Sähkön tuotanto energialähteittäin 2018. [Viitattu 23.3.2020].

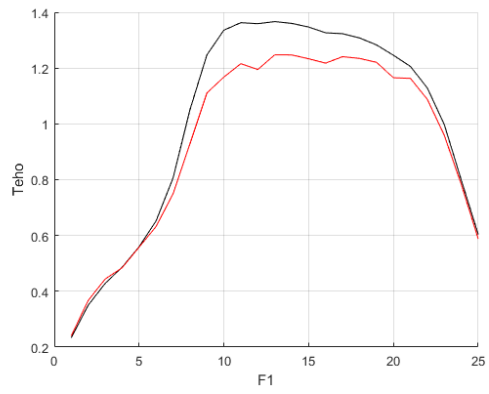
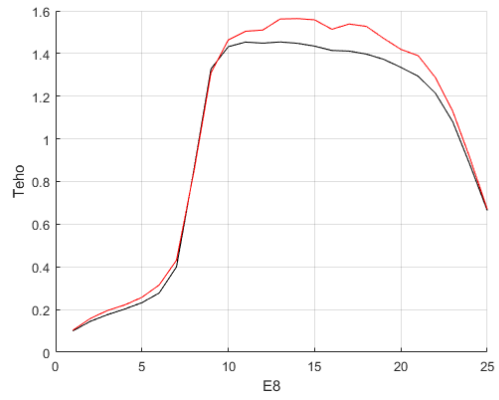
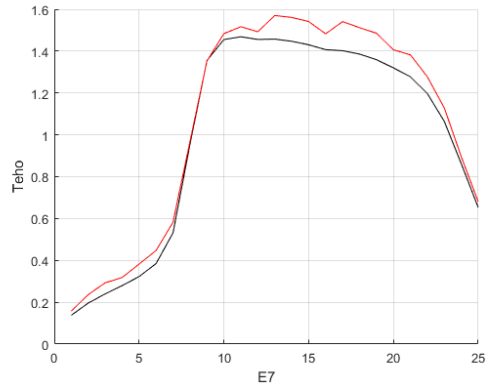
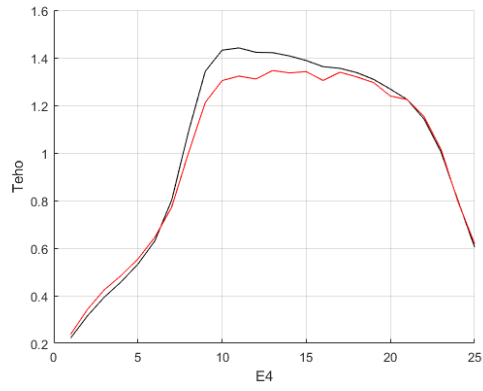
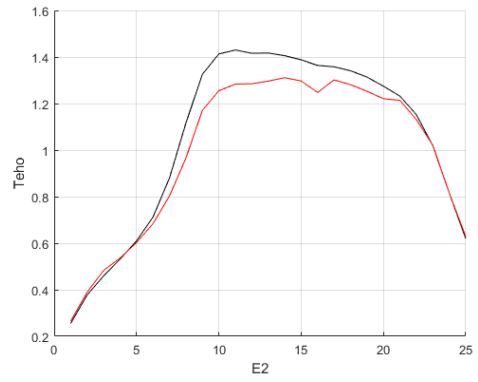
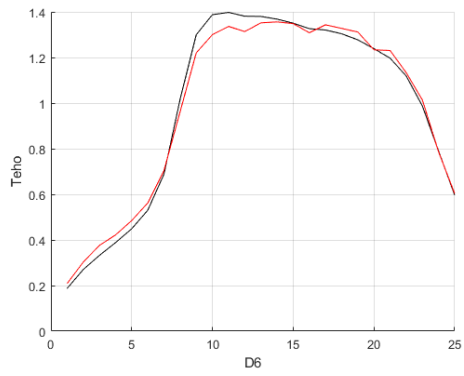
Saatavissa: https://www.stat.fi/til/salatuo/2018/salatuo_2018_2019-11-01_kuv_001_fi.html

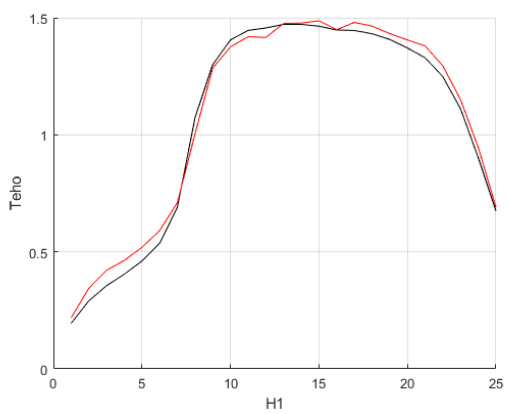
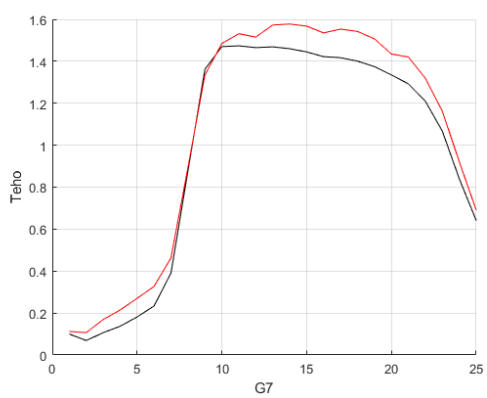
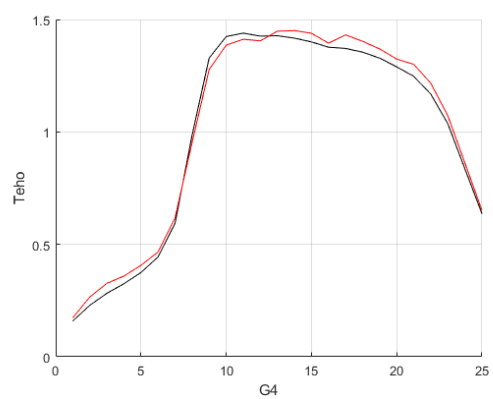
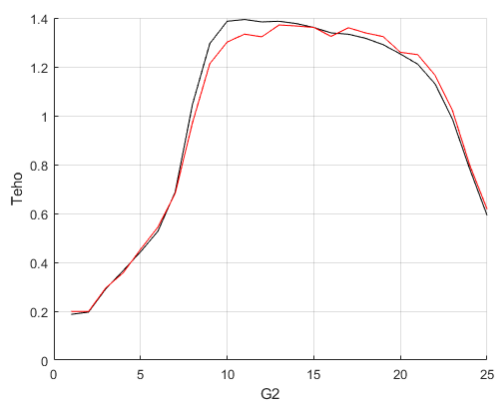
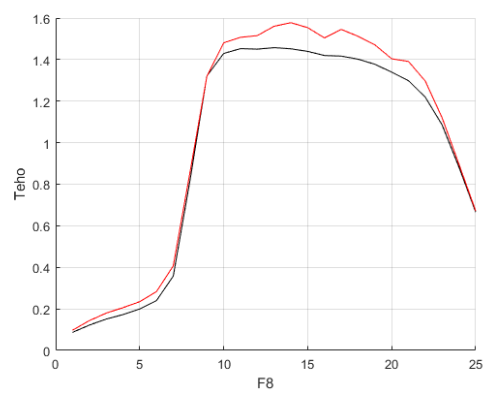
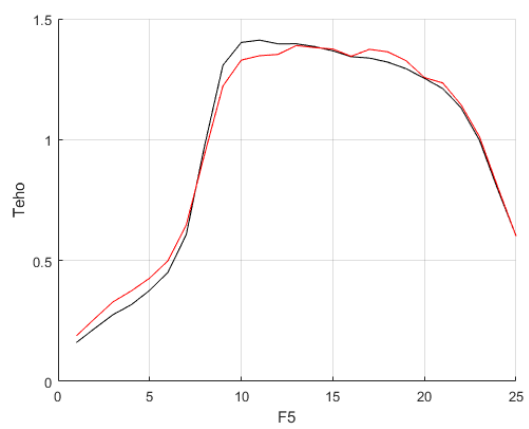
LIITE 1. ELEMENTIN 1 YKSITTÄISTEN SAUVOJEN TEHOPROFIILIT

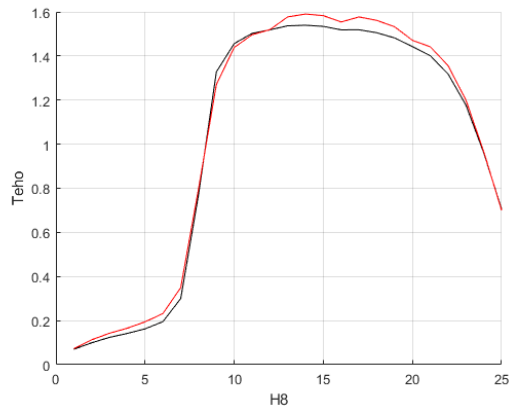
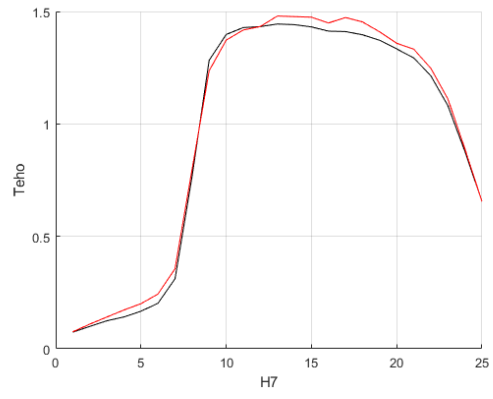
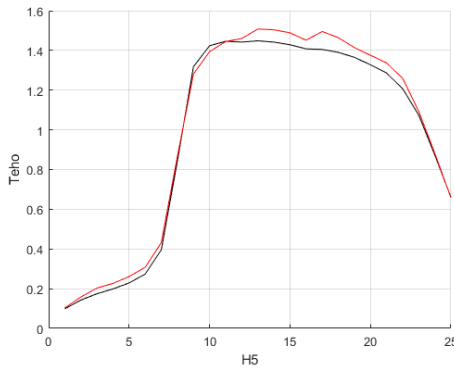
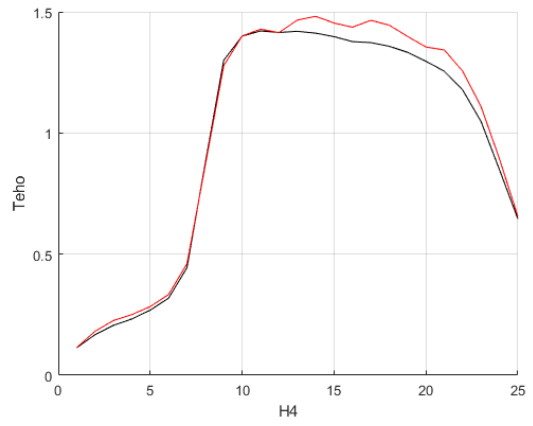
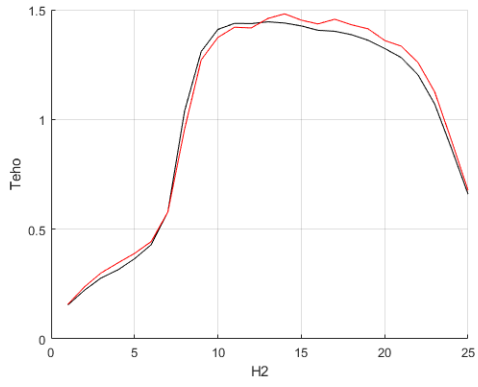
Kuvaajat esittävät yksittäisten elementin 1 yksittäisten sauvojen aksiaalisia tehoprofiileita. Punaisella on piirretty mittaustulokset ja mustalla simulointitulokset. Teho on mielivaltaisessa yksikössä.











LIITE 2. ELEMENTIN 2 YKSITTÄISTEN SAUVOJEN TEHOPROFIILIT

Kuvaajat esittävät yksittäisten elementin 1 yksittäisten sauvojen aksiaalisia tehoprofiileita. Punaisella on piirretty mittaustulokset ja mustalla simulointitulokset. Teho on mielivaltaisessa yksikössä.

