



**CASMO5-KOPPIPALAMAOHJELMAN VALIDOINTI LOVIISAN
VOIMALAITOKSELLE**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2023

Jerry Nissinen

Tarkastajat: Professori Juhani Hyvärinen

TkT Ville Rintala

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikka

Jerry Nissinen

CASMO5-koppipalamaohjelman validointi Loviisan voimalaitokselle

Energiatekniikan diplomityö

2023

120 sivua, 23 kuvaa, 12 taulukkoa, 4 liitettä

Tarkastajat: Professori Juhani Hyvärinen ja TkT Ville Rintala

Avainsanat: CASMO5, lataussuunnittelu, Loviisan voimalaitos, validointi

Loviisan ydinvoimalaitoksen lataussuunnittelussa reaktorisydämen teoreettinen tehojakauma ja tehojakaumasta riippuvat termohydrauliset suureet ratkaistaan käyttämällä kolmiulotteista nodaaliohjelmaa HEXBU-3D ja sauvatehojen rekonstruktio-ohjelmaa ELSI-1440. Kyseisiä ohjelmia käytetään myös reaktorivalvonnassa ohjelmassa RESU-98, joka yhdistää teoreettisesti laskettuun tehojakaumaan reaktorista mitattua lämpötila- ja neutronivuodataa, jolloin laskennan tuloksena saadaan paras mahdollinen arvio reaktorin todellisesta tehojakaumasta. Sekä HEXBU-3D että ELSI-1440 perustuvat kaksiryhmäiseen diffuusioteoriaan, johon tarvittavat kaksiryhmävakiot lasketaan koppipalamaohjelmalla. Loviisan voimalaitoksen lataussuunnittelua sekä reaktorivalvontaa varten ollaan ottamassa tuotantokäyttöön koppipalamaohjelma CASMO5, jonka validointi on tämän työn aihe.

Validointi toteutettiin vertaamalla CASMO5:n avulla laskettuja tuloksia Monte Carlo -ohjelman Serpent 2:n ja tuotantokäytössä olevan koppipalamaohjelman CASMO-4E:n avulla laskettuihin tuloksiin. Verrattuja tuloksia olivat äärettömän hilan kasvutekijät, kaksiryhmävakiot sekä tasapainolatauksen reaktorifysikaaliset ominaisuudet. Lisäksi CASMO5:n ja CASMO-4E:n avulla ennustettuja nipputehoja ja kriittisiä boorikonsentraatioita verrattiin todellisen jakson mittaustuloksiin.

Vertailutulosten perusteella CASMO5 ei aiheuta suuria muutoksia lataussuunnittelussa ja reaktorivalvonnassa käytettyjen ohjelmien laskemiin tuloksiin. CASMO5-ohjelmaa käyttämällä sydänsimuloinnin tulokset ovat vähintään yhtä tarkkoja kuin CASMO-4E-ohjelmalla. Huomionarvoisia muutoksia simulointituloksissa ovat reaktorisydämen tasaisemat tehojakaumat, suuremmat termiset marginaalit, parempi kriittisen boorikonsentraation ennustus käyttöjakson alussa sekä hieman parempi vastaavuus ennustettujen ja mitattujen nipputehojen välillä käyttöjakson aikana. Validoinnin johtopäätös on, että CASMO5 soveltuu tuotantokäyttöön Loviisan voimalaitoksen lataussuunnitteluun ja reaktorivalvontaan.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Jerry Nissinen

Validation of CASMO5 fuel assembly burnup program for the Loviisa nuclear power plant

Master's thesis

2023

120 pages, 23 figures, 12 tables, 4 appendices

Examiners: Professor Juhani Hyvärinen and D.Sc. Ville Rintala

Keywords: CASMO5, core design, Loviisa power plant, validation

In the core design of Loviisa nuclear power plant, three-dimensional power distribution and thermal margins of the reactor core are calculated with nodal code HEXBU-3D and pin power reconstruction program ELSI-1440. These programs are also used in core monitoring program RESU-98, which uses coolant temperature and neutron flux measurements to correct calculated theoretical power distribution. Both HEXBU-3D and ELSI-1440 are based on two-group diffusion theory and the two-group constants required by the theory are created with a lattice physics code. In this work, lattice physics code CASMO5 is validated for the core design and monitoring systems of the Loviisa nuclear power plant.

Validation of CASMO5 was carried out by comparing results produced with CASMO5 against results produced with Monte Carlo program Serpent 2 and CASMO-4E, which is the lattice physics code currently used in production. Compared results were infinite multiplication factors, two-group constants and reactor physical properties of an equilibrium loading pattern. Also, theoretical assembly powers and critical boron concentrations based on CASMO5 and CASMO-4E two-group constants were compared against measurements from a realized cycle.

Based on the comparison results, CASMO5 will not create significant changes to the results produced by the core design and monitoring programs. When CASMO5 is used, reactor core is simulated at least as accurately as when CASMO-4E is used. Noteworthy changes in the simulation results are more even power distributions, larger thermal margins, better prediction of critical boron concentration in the beginning of cycle and slightly better prediction of assembly powers during cycle. Conclusion of the validation is that CASMO5 is suitable for production use in the core design and monitoring systems of the Loviisa power plant.

KIITOKSET

Tahdon erityisesti kiittää Jaakko Kuopanporttia työn ohjaamisesta sekä mahdollisuudesta diplomityön tekemiseen Loviisan voimalaitokselle. Kiitos myös Loviisan voimalaitoksen reaktorifysiikkaryhmälle kannustavasta työilmapiiristä. Sain työhön liittyviin ongelmiin aina tarvittaessa apua, enkä koskaan tuntenut, että olisin ongelmieni kanssa yksin. Lopuksi kiitos vanhemmilleni, jotka ovat jatkuvasti tukeneet minua opiskelutaipaleeni aikana.

Espoossa 4.8.2023

Jerry Nissinen

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

<i>A</i>	pinta-ala	cm ²
<i>B</i>	kupevuus	cm ⁻¹
<i>C</i>	lämpötehojakauman korjausfunktio	
<i>d</i>	ekstrapolaatiopituus	cm
<i>D</i>	diffuusiovakio	cm
<i>E</i>	energia	eV, J
<i>F</i>	nipputehomittausten sovitefunktio	
<i>g</i>	energiaryhmä	
<i>G</i>	massavirtaus	kg s ⁻¹
<i>h</i>	neutronivuon korjausfunktio	
<i>H</i>	entalpia	kJ kg ⁻¹
<i>k</i>	kasvutekijä	
<i>K</i>	sauvatehojakauma online-valvonnassa	Wcm ⁻³
<i>m</i>	mittaus	
<i>M</i>	migraatioalan neliöjuuri	cm
<i>p</i>	nipputeho	MW
<i>P</i>	lämpötehojakauma	Wcm ⁻³
<i>q</i>	sauvatehojakauma	Wcm ⁻³
<i>Q</i>	neutronilähde	cm ⁻² s ⁻¹ sr ⁻¹
<i>s</i>	neutronin kulkema matka	cm
<i>T</i>	lämpötila	K, °C
<i>v</i>	neutronin vauhti	m s ⁻¹
<i>X</i>	tilamuuttuja	

Kreikkalaiset

ε	vapautuva energia per fissio	MeV, J
γ	liikkuvan fissioenergian osuus	
Γ	termoparintulkintakerroin	
λ	suhteellinen nettomassavirta	
ν	syntyvät neutronit per fissio	
ϕ	neutronivuo	cm ⁻² s ⁻¹
φ	nopean ryhmän vuovektori	cm ⁻² s ⁻¹
ψ	kulmavuo	cm ⁻² s ⁻¹ sr ⁻¹

ρ	tiheys	g cm^{-3}
σ	mikroskooppinen vaikutusala	b, cm^2
Σ	makroskooppinen vaikutusala	cm^{-1}

Alaindeksit

0	mielivaltainen
1	nopea energiaryhmä, asymptoottinen
12	sironta nopeasta energiaryhmästä termiseen
21	sironta termisestä energiaryhmästä nopeaan
2	terminen energiaryhmä, transientti
a	absorptio
ave	keskiarvoinen
B	boori
coo	jäähdyte
eff	efektiivinen
f	fissio
g	energiaryhmä
hom	homogenisoitu
γ	liikkuva fissioenergia
IGAP	nipun sisäinen vesirako
k	anturitaso
kor	korjaus
m	suuntaindeksi
n	polttoainenippu
OUTR	nippujen välinen alue
rem	poisto
ref	referenssi
tot	kokonais
tr	transport

Yläindeksit

0	ei booria
g	energiaryhmä

Lyhenteet

BOC	beginning of cycle
BNFL	British Nuclear Fuels Limited
CENT	keskusputki
CFD	computational fluid dynamics
CRAM	Chebyshev rational approximation method
DNB	departure from nucleate boiling
EOC	end of cycle
FPD	full power days
FS	flat source
IGAP	nipun sisäinen vesirako
LOCA	loss-of-coolant accident
LS	linear source
OUTR	nippujen välinen alue
SPND	self powered neutron detector
TC	thermocouple

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto	11
2	Koppipalamaohjelman validoinnissa käytettyjen polttoaineiden kuvaus	15
3	Laskentaohjelmat	20
3.1	CASMO5	20
3.1.1	Resonanssit huomioivien mikroryhmävaikutusalojen luonti	21
3.1.2	Mikroryhmälasku yhdessä ulottuvuudessa	22
3.1.3	Transporyhtälön ratkaisu kahdessa ulottuvuudessa	23
3.1.4	Tuloksien tallentaminen	25
3.1.5	Uusien atomitiheyksien määrittäminen palamalaskussa	26
3.1.6	Koppipalamalaskenta Loviisan voimalaitoksella	26
3.2	HEXBU-3D	28
3.2.1	Neutronivuojakauman ratkaisu	28
3.2.2	Takaisinkytkentöjen mallintaminen	30
3.2.3	Reunaehdot ja mallinnusvirhe	32
3.3	ELSI-1440	34
3.3.1	Laskenta-alue sauvatehojen ratkaisemista varten	34
3.3.2	Sauvataso tehojakauman ratkaisu	35
3.3.3	Nipun sisäisen virtausjakauman määrittäminen	39
3.4	RESU-98	40
3.4.1	Reaktorisydämen kolmiulotteisen tehojakauman laskenta	41
3.4.2	Sauvataso tehojakauma reaktorin online-valvonnassa	44
3.4.3	Termohydraulisten suureiden ja palaman laskenta	45
4	Koppipalamaohjelman tuottaman datan jälkikäsitteily	47

4.1	Nodaali- ja sauvatehorekonstruktio-ohjelman tarvitsemien parametrien kuvaus	47
4.2	Jälkikäsitteilyohjelmistojen kuvaus	52
4.3	Ryhmävaikutusalojen jälkikäsitteily	58
4.4	Laskentajärjestelmään tehdyt muutoksen CASMO5-ohjelmaa varten	64
5	Validointimenetelmät	70
5.1	Vertailu CASMO5-, CASMO-4E- ja Serpent 2 -ohjelmien välillä	70
5.1.1	Toimenpiteet CASMO–Serpent-laskennan vertailukelpoistamiseksi	70
5.1.2	Serpent 2 -ohjelman lähtöasetukset	77
5.2	Jälkikäsitteilyn tuloksena syntyvien diffuusioparametrien vertailu	79
5.3	Tasapainolatausvertailu	80
5.3.1	Vertailussa käytetty osittain vähävuotoinen 301 nipun tasapainolataus	80
5.3.2	Tasapainolatauksen reaktorifysikaalisten ominaisuuksien laskenta	83
5.4	Laskettujen tuloksien vertailu mitattuihin tuloksiin	85
5.4.1	Laskenta RESU-98-ohjelman offline-versiolla	86
5.4.2	Nipputehujen mittaaminen	87
5.4.3	Kriittisen boorikonsentraation mittaaminen	88
6	Tulokset	90
6.1	CASMO–Serpent-vertailutulokset	90
6.2	Jälkikäsitteilyn tuloksena syntyvien diffuusioparametrien vertailutulokset .	94
6.3	Tasapainolatausten vertailutulokset	98
6.3.1	Kriittinen boorikonsentraatio	98
6.3.2	Sammutusmarginaalit ja säätösauvojen tehokkuudet	99
6.3.3	Tehojakaumat	101
6.3.4	Termiset nousuvarat	103
6.3.5	Palamajakaumat	105
6.3.6	Reaktiivisuuskertoimet	106
6.3.7	Pistekineettiset parametrit	108
6.4	Teoreettisten suureiden vertailu mitattuihin suureisiin	109
6.4.1	Suhteellisen nipputehon vertailu mittauksiin	109

6.4.2 Kriittisen boorikonsentraation vertailu mittauksiin	112
7 Johtopäätökset	114
8 Yhteenveto	115
Lähteet	116

Liitteet

Liite 1. CASMO–Serpent-vertailun atomitiheystulokset

Liite 2. HEXBU-3D-ohjelmassa käytettyjen diffuusioparametrien vertailutulokset

Liite 3. ELSI-1440-ohjelmassa käytettyjen diffuusioparametrien implisiittiset vertailutulokset

Liite 4. Erot tasapainolatausten reaktorifysikaalisissa ominaisuuksissa

1 Johdanto

Neutronien käyttäytymisen mallintaminen reaktorisydämessä on välttämätöntä ydinvoimalaitoksen lataussuunnittelun ja reaktorivalvonnan kannalta, koska reaktorisydämen tuotama lämpöteho riippuu pohjimmiltaan neutronien aiheuttamista fissioreaktioista. Loviisan voimalaitoksella neutronikäyttäytymisen simulointiin käytetään nodaaliohjelmaa sekä sauvatehojen rekonstruktio-ohjelmaa. Molemmat ohjelmat perustuvat kaksiryhmäiseen diffuusioteoriaan ja ne tarvitsevat simuloinnin tekemiseen parametrejä kuten homogenisoidut ryhmävakiot, joilla neutronikäyttäytyminen voidaan mallintaa nippu- ja sauvatasolla.

Lähtökohtaisesti esimerkiksi uuden polttoaineen käyttöönotossa sydänsimulointiin tarvittavia parametrejä kuten homogenisoituja ryhmävakioita ei kuitenkaan tunneta: reaktorirakenteen lisäksi tunnetaan yksittäisten polttoainenippujen komponenttien (polttoainepelletit, suojakuoret jne.) geometriset mitat, massat sekä säteilyttämättömien komponenttien tiheydet ja nuklidien massaosuudet. Näiden rajallisten lähtötietojen pohjalta on kyettävä luomaan polttoainenippuja ja -sauvoja kuvaavat parametrejä, joilla reaktorisydämen eli polttoainenipuista, säätösauvoista, jäähdytteestä ja sydämen reunoista muodostuvan kokonaisuuden neutroniikka voidaan selvittää riittävällä tarkkuudella missä tahansa kohtaa tuotantojaksoa sydänsimulointiin käytetyillä ohjelmilla. Parametrien on kyettävä kuvaamaan sydämen sisäistä kolmiulotteista neutronikäyttäytymistä siten, että lämpötehojakoumat voidaan selvittää sauvatason resoluutiolla. Lisäksi niiden avulla on pystyttävä huomioimaan reaktoriolosuhteissa tapahtuvien muutosten vaikutus neutronikäyttäytymisessä.

Sydäntason laskennassa käytettävillä parametreilla polttoainenippuja on kyettävä kuvaamaan kolmiulotteisesti, koska nukliditiheydet eroavat aksiaali- ja radiaalisuunnissa yksittäisissä polttoainenipuissa. Nipun tietyn pisteen läheisyydessä oleviin nukliditiheyksiin vaikuttaa nipun ikä reaktorissa (eli kuinka monta käyttöjaksoa nippu on ollut säteilytettyinä) ja toisaalta esimerkiksi, missä kohtaa nippua tarkasteltava piste sijaitsee. Esimerkiksi fissioita tapahtuu sydämessä normaalisti enemmän nippujen keskiosissa kuin ala- ja yläosissa.

Reaktorisydämen neutroniikka riippuu nukliditiheyksien lisäksi reaktoriolosuhteista. Esimerkiksi täydellä teholla toimivan reaktorisydämen reaktiivisuus on takaisinkytkentöjen takia pienempi kuin nollatehoisen reaktorin, jos jakaumat polttoaineniippujen nukliditiheyksissä tilanteiden välillä oletetaan identtisiksi. Sydänsimulointiin tarvittavat parametrit on luotava siten, että niillä voidaan kuvata useita eri reaktoritiloja, jotka ovat luonteeltaan pysyviä. Tyypillisesti tämä tarkoittaa ainakin tehotilaa ja nollatehotilaa kuvaavia parametreja. Lisäksi parametreilla on kyettävä huomioimaan hetkelliset poikkeamat pysyvistä reaktoriolosuhteissa, millä tarkoitetaan esimerkiksi boorikonsentraation tai polttoainepellettien lämpötilan äkillistä muutosta.

Lataussuunnittelua ja reaktorivalvontaa varten reaktorisydämen neutronikäyttäytyminen on kyettävä simuloimaan ajallisesti nopeasti, mutta tarkkuudella, joka vastaa riittävän hyvin todellisuutta. Reaktorivalvonnan kannalta laskennan nopeuden tarve on selvää, sillä reaktorissa tapahtuviin muutoksiin on kyettävä reagoimaan riittävän lyhyellä vasteajalla. Toisaalta myös lataussuunnittelussa laskennan nopeus on tärkeää, koska vaihtolatauksen jälkeisen optimaalisen latauksen löytämiseen voidaan helposti tarvita satoja tuhansia sydäntason simulaatioita.

Loviisan voimalaitoksella sydäntason simulointiin tarvittavat ohjelmistot voidaan jakaa kahteen luokkaan: ohjelmistot, jotka luovat simulointiin tarvittavat neutronikäyttäytymistä kuvaavat parametrit ja ohjelmistot, jotka käyttävät luotuja parametreja sydänsimulointiin. Edelliseen luokkaan kuuluvat koppelamaohjelma sekä koppelamaohjelman luoman datan jälkikäsitteilyohjelmat, joilla koppelamaohjelman luomaa dataa muokataan sekä muutetaan sopivaan muotoon jatkokäyttöä varten. Jälkimmäiseen luokkaan kuuluvat nodaaliohjelma, sauvatehojen rekonstruoimiseen käytetty ohjelma sekä reaktorivalvonnassa käytetty ohjelma. Nodaaliohjelma jakaa sydämen polttoaineniiput kolmiulotteisiin homogeenisiin noodeihin ja ratkaisee neutronivuo- ja tehojakauman nooiden sisällä. Näin saadaan koko sydäntä kuvaava kolmiulotteinen neutroni- ja tehojakauma nooditason resoluutiolla. Sauvatehojen rekonstruktio-ohjelma ohjelma käyttää nodaaliohjelman ratkaisemaa neutronivuojakaumaa reunaehtona ja ratkaisee tehojakauman jokaisen noodin sisällä sauvatason resoluutiolla. Nodaaliohjelma ja sauvatehojen rekonstruktio-ohjelma ovat lataussuunnittelun ja reaktorivalvonnan kannalta laskennallisesti riittävän nopeita sydäntason simulointiin. Reaktorivalvonnassa käytetty ohjelma yhdistää nodaaliohjelman ja sau-

vatehojen rekonstruktio-ohjelman simuloimaa dataa reaktorisydäimestä mitattuun dataan ja muodostaa näin arvion todellisesta sydämen kolmiulotteisesta tehojakaumasta sauvatasolla.

Tässä työssä on käytetty kaikkia edellä mainittuja ohjelmia, mutta pääpaino on koppipalamaohjelmassa. Loviisan voimalaitoksella ollaan ottamassa tuotantokäyttöön uutta koppipalamaohjelmaa CASMO5, jonka validointi Loviisan voimalaitoksen sydänsimuloinnin tekeviin laskentajärjestelmiin on tämän työn aihe. Koppipalamaohjelma käyttää edellä mainittuja rajallisia alkutietoja polttoainepuusta ja ratkaisee niiden perusteella neutronikäyttäytymistä kuvaavan Boltzmannin transportyhtälön useassa eri polttoainepuun palamapisteessä. Transportyhtälön ratkaisun perusteella ohjelma laskee suuren määrän neutronikäyttäytymistä kuvaavaa dataa, josta nodaaliohjelman ja sauvatehojen rekonstruktio-ohjelman tarvitsemat parametrit tuotetaan jälkikäsitteilyohjelmalla. Työn päätavoite on varmistaa, että uusi koppipalamaohjelma CASMO5 soveltuu Loviisan voimalaitoksen laskentajärjestelmiin. Validointi suoritetaan vertaamalla laskentatuloksia referenssituloksiin. Referenssituloksina käytetään tätä työtä kirjoittaessa tuotantokäytössä olevan koppipalamaohjelman CASMO-4E avulla laskettuja tuloksia sekä reaktorista mitattuja arvoja. Mittauksia voidaan pitää arvokkaampana vertailuaineistona, mutta niihin sisältyy epävarmuutta, minkä takia CASMO-4E:n avulla saatuihin tuloksiin vertaaminen on tärkeää. Erityistä huomiota kiinnitetään myös jälkikäsitteilyohjelmien toiminnan varmistamiseen, sillä ne toimivat linkkinä koppipalamaohjelman ja sydänsimuloinnin tekevien ohjelmien välillä.

Työn rakenne on seuraava. Toisessa luvussa kuvataan validoinnissa käytetyt polttoainetyypit, sillä niihin sekä niiden komponentteihin viitataan työssä useasti. Kolmannessa luvussa kuvataan koppipalamaohjelma CASMO5 sekä Loviisan voimalaitoksen sydänsimuloinnissa käytetyt ohjelmat, joita on käytetty validoinnissa. Neljäs luku liittyy koppipalamaohjelman tuottaman datan jälkikäsitteilyyn. Viides ja kuudes luku liittyvät varsinaiseen CASMO5-ohjelman validointiin. Viidennessä luvussa määritellään käytetyt validointimenetelmät: vertailu Monte Carlo -ohjelman laskemiin tuloksiin, jälkikäsitteilyn seurauksena syntyvien valittujen parametrien vertailu, vertailu kahden tasapainolatauksen välillä ja lopuksi vertailu todellisen käyttöjakson aikana reaktorista kerättyihin mittauksiin. Kuudennessa luvussa esitetään validointimenetelmien tulokset. Seitsemännessä luvussa esitetään

johtopäätökset validoinnista eli CASMO5-ohjelman soveltuvuudesta Loviisan voimalaitokselle. Viimeisessä eli kahdeksannessa luvussa tehdään yhteenveto työstä. Validointilaskennassa syntyy runsaasti tuloksia, joten ainoastaan tärkeimmät niistä on esitetty työssä. Loput tuloksista on lisätty liitteiksi. Lisäksi laskentaohjelmissa käytetyt syötetiedostot on päätetty jättää lisäämättä työhön niissä käytetyn datan luottamuksellisuuden takia. Kaikki laskentaohjelmissa käytetyt syötetiedostot on tallennettu Loviisan voimalaitoksen reaktorifysiikkaryhmän käyttämiin järjestelmiin.

2 Koppipalamaohjelman validoinnissa käytettyjen polttoaineiden kuvaus

Loviisan voimalaitoksella käytössä oleva reaktorityyppi on VVER-440-reaktori. Kyseinen reaktorityyppi on heksagonaalisen muotoisia polttoainenippuja käyttävä painevesi-reaktori, jossa boorattua vettä käytetään kriittisyyden hallintaan, lämmönsiirtoaineena sekä neutronien moderaattorina. Lisäksi kriittisyyttä hallitaan säätösauvojen avulla. Tässä luvussa keskitytään ainoastaan polttoaineen ja reaktorisydämen kuvaamiseen. Loviisan voimalaitoksen VVER-440-reaktoria on kuvattu laajemmin esimerkiksi viitteessä (Lepänen, 2021, 10). Validointilaskenta on tehty kahdella eri polttoaineella, joista käytetään tässä työssä nimityksiä ”polttoaine A” ja ”polttoaine B”. Polttoaineiden tarkat materiaali- ja geometriatiedot ovat luottamuksellisia, joten polttoaineet kuvataan tässä luvussa yleisellä tasolla.

Polttoaineella tarkoitetaan tässä työssä kiinteää polttoainenippua ja säätösauvojen polttoainejatkkeita. VVER-440-reaktorin polttoainenippu koostuu kuusikulmaisista levyistä valmistetusta suojakotelosta ja suojakotelon sisäisestä sauvanipusta. Sauvanippu pidetään koossa sauvanipun keskellä sijaitsevan keskusputken, ylä- ja alahilojen sekä välilihilojen avulla, joiden määrä riippuu polttoainetyypistä (Lehtinen ja Kekkonen, 2023, 12). Vuodesta 2012 lähtien Loviisan voimalaitoksella käytetyissä polttoaineen A välilihiloissa on käytetty sekoitusväkäsiä, jotka tasoittavat jäähdytteen lämpötilajakaumaa nipun sisällä (Lehtinen ja Kekkonen, 2023, 13). Sekoitusväkäset omaavia välilihoja kutsutaan sekoitusvälilihiloiksi. Polttoaineen B välihilat ovat myös sekoitusvälilihoja ja niissä luvussa 3.3.3 kuvatun sekoittumismallin parametrit oletetaan samaksi kuin polttoainevalmistajan BNFL:n (British Nuclear Fuels Limited) polttoaineella, jota on historiallisesti käytetty Loviisan voimalaitoksella (Kuusisto, 2004). BNFL-polttoainetta ei ole käytetty Loviisan voimalaitoksella energiantuotannossa vuoden 2012 jälkeen (Lehtinen ja Kekkonen, 2023, 20). Luvun 6.4 vertauksissa mittauksiin on käytetty myös vuodesta 2009 käytössä ollutta polttoaineen A variaatiota, jossa ei ole sekoitusvälilihoja. Koppipalamalaskennassa välihilat otetaan huomioon homogenisoimalla välihilat jäähdytteeseen. Välilihilojen homogenisoinnin seurauksena nippujen sisällä virtaava jäähdyte voidaan ajatella jäähdytteen ja välihilan nuklideista koostuvaksi kuvitteelliseksi sekoitukseksi. Välilihilojen homogeni-

soinnissa keskeinen parametri on välihilan massa per nipun aksiaalisuuntainen pituusyksikkö. Kun termohydraulinen takaisinkytkentä jätetään huomioimatta, neutroniikan kannalta polttoaine A ja sen variaatio ilman sekoitusvälihiloja ovat hyvin samanlaiset: ainoa ero koppipalamaohjelmien syötetiedoissa polttoaineiden välillä on, että sekoitusvälihilalliselle polttoaineelle välihilan massa per pituusyksikkö on hieman suurempi.

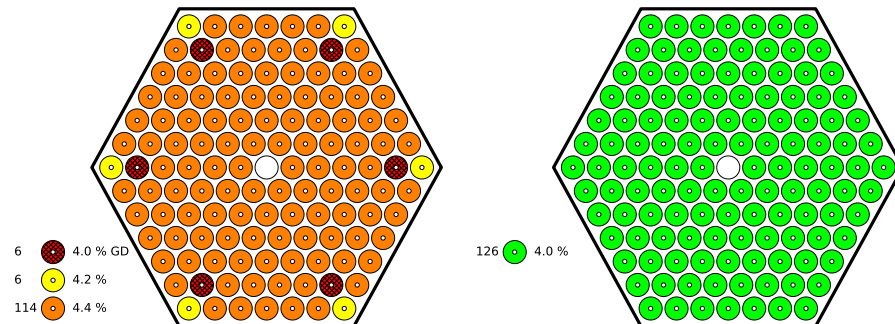
Kiinteät polttoaineniput asetetaan reaktorisydämen alatuokilevyssä sijaitseviin virtausreikiin ja ne pysyvät paikallaan jakson aikana (Lehtinen ja Kekkonen, 2023, 11). VVER-440-reaktorin polttoainejatkeet muodostavat yhdessä absorbaattoriosien kanssa reaktorin säätösauvat. Säätösauvoja liikutetaan reaktorissa kuudessa ryhmässä, joista viiteen kuuluu kuusi säätösauvaa. Nämä ryhmät eivät osallistu reaktiivisuuden säätöön muulloin kuin reaktorin sammutuksen yhteydessä tai poikkeustilanteissa kuten reaktorin pikasulussa. Yksi säätösauvaryhmä, johon kuuluu seitsemän sauvaa, on niin sanottu säätävä ryhmä, jota voidaan käyttää tehon säätöön esimerkiksi, jos vaaditaan nopeampaa tehon säätöä kuin boorauksen säädöllä on mahdollista. Polttoainejatke on yläpäästään välitankojen välityksellä säätösauvakoneistoon kiinnitetty polttoainenippu, joka liikkuu säätösauvan liikkuessa (Lehtinen ja Kekkonen, 2023, 4). Yksinkertaistettuna absorbaattoriosia koostuu päällekkäin pinotuista kuusikulmaisista booriteräsholkeista, jotka sijaitsevat suojakotelon sisällä. Absorbaattoriosien alapäätykappaleet sopivat jatkeiden yläpäätyosien sisään ja absorbaattoriosat lepäävät jatkeiden päällä omalla painollaan (Lehtinen ja Kekkonen, 2023, 14). Absorbaattoriosan liike ylöspäin on kuitenkin estetty välitangossa olevalla liikkeenrajoittimella, jolloin absorbaattoriosia liikkuu aina jatkeen mukana (Lehtinen ja Kekkonen, 2023, 14). Reaktorin toimiessa nimellisellä 1500 MW teholla, säätösauvat ovat tavallisesti mahdollisimman vähän työnnettynä reaktorisydämeen (Vehmaanperä, 2020, 9). Tällöin säätösauvojen polttoainejatkeet ovat absorbaattoriosien paikalla sydämessä. Jos taas säätösauvat ovat täysin työnnettynä sydämeen, polttoainejatkeet sijaitsevat sydämen alapuolella ja absorbaattoriosat sydämessä. Tällä hetkellä käytettyjen jatkeiden aktiivikorkeus on 12 cm kiinteiden nippujen 250 cm aktiivikorkeutta lyhempi ja alareuna ei ole samalla tasolla säätösauvojen ollessa yläasennossa. Alareunan korkeuserosta aiheutuu toistaiseksi mallinnusvirhe, joka on otettava huomioon simuloinnissa. Mallinnusvirhettä käsitellään luvussa 3.2.3. Ennen vuotta 2021 Loviisan voimalaitoksen reaktoreissa on ollut 276 paikkaa kiinteille nippuille, 37 paikkaa jatkeille ja 36 paikkaa paineastiaa neutronivuolta

suojaaville reaktorisydämen reunalla sijaitseville suojaelementeille. Vuoden 2023 syksyllä alkavilla jaksoilla kummassakin Loviisan voimalaitoksen reaktorissa on 264 paikkaa kiinteille nipuille, koska reaktoreihin on lisätty 12 suojalementtiä sydämen reunoille vaimentamaan paineastiaan kohdistuvaa neutronivuota.

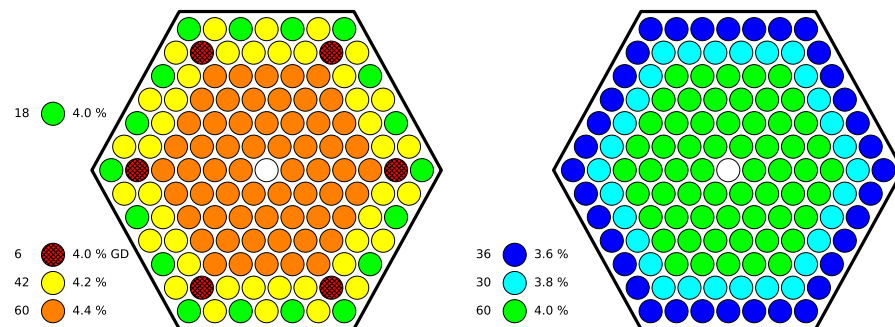
Polttoainesauvojen väkevöintiprofiloinnit polttoaineelle A on esitetty kuvassa 1 ja polttoaineelle B kuvassa 2. Nipuissa on 126 polttoainesauvaa ja yksi keskusputki kolmiohilassa. Yksittäisten polttoainesauvojen lukumäärä ja polttoainepellettien väkevöinti on nähtävillä profiointikuvien vieressä. Kuten kuvista 1 ja 2 ilmenee, kaikkien polttoainepippujen profiloidut noudattavat 30 asteen rotaatiosymmetriää. Polttoaineen A kiinteän nipun keskiväkevöinti on 4,372 % ja kuudessa sauvassa on n. 2,9 massaprosenttia gadoliniumia palavana absorbaattorina (kuvissa 1 ja 2 gadoliniumia sisältävän sauvan viereen on lisätty ”GD”). Gadolinium tulee polttoainepellettiin gadoliniumoksidista (Gd_2O_3), jonka gadoliniumia vastaava massaprosentti on n. 3,35 %. Jatkeen keskiväkevöinti on 4,000 % ja se ei sisällä palavaa absorbaattoria. Kaikissa polttoaineen A polttoainepelleteissä on keskusreikä. Polttoaineen B kiinteän nipun keskiväkevöinti on 4,258 % ja myös siinä kuudessa sauvassa on 2,9 massaprosenttia gadoliniumia palavana absorbaattoria. Jatkeen keskiväkevöinti on 3,838 % ja siinä ei ole palavaa absorbaattoria. Polttoaineen B polttoainepelleteissä ei ole keskusreikää.

Polttoainepelletit on valmistettu uraanioksidista sintraamalla ja ne sijaitsevat pinottuna kaasutiiviistä suojakuoriputkista koostuvien polttoainesauvojen sisällä (Lehtinen ja Kekkonen, 2023, 13). Pelletit approksimoidaan koppipalamalaskennassa joko onttoina (keskusreiällinen pelletti) tai umpinaisina (keskusreiätön pelletti) sylintereinä, vaikka todellisuudessa esimerkiksi polttoaineen A polttoainepelletin reunoissa on viisteet (Lehtinen ja Kekkonen, 2023, 13). Kiinteän nipun ja jatkeen polttoaineen nimellinen tehotiheys riippuu koko sydämen uraanimassasta. Nykyään käytössä olevalla polttoaineella A nimellinen tehotiheys on 38,16 W/gU ja polttoaineelle B on käytetty nimellistä tehotiheyttä 38,62 W/gU. Nimellinen tehotiheys lasketaan jakamalla reaktorin nimellisteho 1500 MW (säteilöttämättömien) kiinteiden nippujen ja jatkeiden yhteisellä uraanimassalla. Sekä kiinteät niput että jatkeet käyttävät siis koppipalamalaskennassa samaa nimellistä tehotiheyttä. Lisäksi koppipalamalaskennassa oletetaan aksiaalisuunnassa translaatiosymmetria, jossa kuvien 1 ja 2 mukainen nippujen ”edustava” rakenne säilyy aksiaalisuunnassa. Toisin sa-

nottuna polttoaineiden päätyrakenteita ei oteta huomioon koppipalamaohjelman geometriamallinuksessa.



Kuva 1. Polttoaineen A väkevöintiprofiloinnit. Vasen: kiinteä nippu, keskiväkevöinti 4,372 %. Oikea: jatke, keskiväkevöinti 4,000 %.



Kuva 2. Polttoaineen B väkevöintiprofiloinnit. Vasen: kiinteä nippu, keskiväkevöinti 4,258 %. Oikea: jatke, keskiväkevöinti 3,838 %.

Sekä polttoaine A:n että B:n suojakotelo, keskusputki, sauvojen suojakuoret ja välihilat koostuvat pääasiassa luonnollisesta zirkoniumista sekä pienestä määrästä luonnollista hafniumia. Huomionarvoinen yksityiskohta polttoaineessa A ja polttoaineessa B on, että molemmissa polttoaineissa joihinkin edellä lueteltuihin komponentteihin on sekoitettu niobiumia (Nb-93), jonka tässä työssä käytetty CASMO5-versio käsittelee virheellisesti tietyillä lähtöoletuksilla. CASMO5:n virheellinen käytös Nb-93:n käsittelyssä on kuitenkin mahdollistaa kiertää. Virheen luonnetta sekä sen korjausta käsitellään luvussa 4.4.

Luvun 6 tuloksien kuvaamista varten on tässä vaiheessa hyödyllistä määritellä sydämen kuvaamiseen tarvittavat suureet koppipalamaohjelman kannalta. Taulukossa 1 on lueteltu koppipalamalaskennassa käytetyt tilamuuttujat sekä reaktorihilan hilavakio, joita

on historiallisesti käytetty Loviisan voimalaitoksen koppipalamalaskennassa CASMO-4E-ohjelmassa. Taulukko 1 vastaa täyden tehon nimellistilaa. Lämpötilat eivät todellisuudessa ole vakioita, sillä ne muuttuvat reaktorisydämessä etenkin aksiaalisuunnassa. Myös boorikonsentraatio muuttuu käyttöjakson aikana. Muutokset tilamuuttujissa huomioidaan sydänsimulaatioissa korjaamalla laskentaan tarvittavia ryhmävaikutusaloja sovitteiden avulla. Sovitteisiin tarvittava data tuotetaan koppipalamalaskennassa kerroinlaskennalla, jossa tilamuuttujia varioidaan. Tilamuuttujien muutoksista aiheutuvia takaisinkytkentöjä on kuvattu luvussa 3.2.2 ja kerroinlaskentaa luvussa 4.1. Nollatehotiloissa tehtävässä koppipalamalaskennassa tehotiheydet ovat luonnollisesti nollija ja komponenttien lämpötilat ovat isotermisiä, esimerkiksi 260 °C. Lisäksi nollatehotiloissa Xe-135 atomitiheys oletetaan nolllaksi. Luvussa 5.1 kuvatussa Monte Carlo -laskennassa käytetään myös taulukon 1 arvoja. Boorikonsentraatio määritellään täsmällisesti luvussa 5.4.3. Moderaattori on samaa ainetta kuin jäähdyte, mutta se sijaitsee polttoainepun suojakotelon ulkopuolella.

Taulukko 1. Koppipalamalaskennassa käytetyt reaktorin täyden tehon nimellistilaa kuvaavat arvot.

Primääripiirin paine	123 bar
Reaktorin nippuhilan hilavakio	14,7 cm
Tehotiheys (polttoaine A)	38,16 W/gU
Tehotiheys (polttoaine B)	38,62 W/gU
Boorikonsentraatio	500 ppm
Xe-135 atomitiheys	tasapainotila
Moderaattorin lämpötila	540 K
Jäähdytteen lämpötila	558 K
Polttoainepelletin lämpötila	873 K
Sauvan suojakuoren lämpötila	588 K
Suojakotelon lämpötila	548 K
Keskusputken suojakuoren lämpötila	558 K
Reaktorin tukirakenteiden lämpötila	540 K

3 Laskentaohjelmat

Tässä luvussa kuvataan oleellisilta osin koppelamaohjelma CASMO5 sekä muut Loviisan voimalaitoksen lataussuunnittelussa ja reaktorivalvonnassa käytettävät ohjelmistot, joita on käytetty koppelamaohjelman validoinnissa: nodaaliohjelma HEXBU-3D, sauvatehojen rekonstruktio-ohjelma ELSI-1440 ja reaktorivalvontaohjelma RESU-98. CASMO-4E on nykyisin käytössä oleva koppelamaohjelma, jota on myös käytetty tässä työssä CASMO5-ohjelman validoinnissa. Ohjelmaa ei kuitenkaan erityisesti kuvata tässä luvussa. Pääerot CASMO5- ja CASMO-4E-ohjelmien välillä on kuvattu viitteessä (Hykes et al., 2022b, 23).

3.1 CASMO5

CASMO5 (Hykes et al., 2022a) on Studsvik Scandpowerin kehittämä deterministinen koppelamaohjelma. Erityisesti CASMO5 on tarkoitettu ryhmävakioiden luomiseen muille Studsvik Scandpowerin kehittämille ohjelmistoille kuten nodaaliohjelmalle SIMULATE5 (Hykes et al., 2022a, iii). Tässä työssä on käytetty VVER-440 reaktoreille soveltuvaa CASMO5-versiota 3.06.00L VVER, joka sisältää heksagonaalisiin geometrioihin soveltuvan laskentamoduulin. Kaikki CASMO5:n tekemä laskenta on tässä työssä tehty käyttämällä ohjelman mukana tullutta ydindatakirjastoa¹, joka perustuu pääosin ydindatakirjastoon ENDF/B-VII.1 (Chadwick et al., 2011) ja jota on täydennetty kirjastojen TENDL-2012 (Koning et al., 2019) sekä JENDL-4 (Shibata et al., 2011) datalla sekä prosessoitu ohjelmilla NJOY-94.105 (MacFarlane ja Muir, 1994) ja NJOY-2012.8 (Muir et al., 2012). Lisäksi kirjasto sisältää Studsvik Scandpowerin omilla ohjelmilla luotua ”apudataa” kuten monimutkaisten materiaalien vaikutusaloja. Yhteensä CASMO5:n ydindatakirjastossa käytetään 586 energiaryhmää, mikä on yksi merkittävimmistä eroista tätä työtä kirjoittaessa tuotantokäytössä olevaan koppelamaohjelmaan CASMO-4E (Rhodes et al., 2004), jonka käyttämissä neutronikirjastoissa käytetään enimmillään 70 energiaryhmää².

¹Kirjastosta käytetään tämän työn CASMO5-versiossa nimitystä ”e7r1.202.586.bin”

²Loviisan voimalaitoksen lataussuunnittelun kannalta oleellisimman CASMO-4E:n käyttämän ENDF/B-IV-dataan perustuvan (Rantamäki ja Anttila, 2008) neutronikirjaston nimi on ”e4l1b70”.

(Hykes et al., 2022b)

CASMO5 on kaupallinen ohjelma, joten sen käyttämää metodologiaa ei voida kuvata tässä samalla laajuudella, jolla se on kuvattu luottamuksellisessa käyttäjille tarkoitetussa metodologiamanuaalissa (Hykes et al., 2022a). Tämän vuoksi CASMO5:n käyttämä metodologia kuvataan seuraavaksi lyhyesti yleisellä tasolla käyttämällä ei-luottamuksellisia avoimesti saatavilla olevia lähteitä. Laskennan kulku CASMO5-ohjelmassa voidaan jakaa viiteen päävaiheeseen: resonanssit huomioivien mikroryhmävaikutusalojen luonti, mikroryhmälasku yhdessä ulottuvuudessa, transport-lasku kahdessa ulottuvuudessa, harvaryhmävakioiden, epäjatkuvuustekijöiden ym. parametrien laskeminen ja tallentaminen sekä lopuksi palamalasku, jossa materiaalialueiden atomitiheydet päivitetään seuraavaa palamapistettä varten (Haugh ja Ferrer, 2015, 3). CASMO5:n simuloima polttoainenippu kuvataan ohjelmassa hilana, jossa hilakoppi on tyypillisesti polttoainesauva (polttoainepelletti, kaasuaukko ja suojakuori) ja sitä ympäröivä jäähdyte. Hilakopista käytetään nimitystä ”makroalue” ja hilakopin sisäisiä alueita nimitetään ”mikroalueiksi”.

3.1.1 Resonanssit huomioivien mikroryhmävaikutusalojen luonti

CASMO5 aloittaa laskennan luomalla resonanssiabsorptioiden aiheuttaman itsesuojauskseen huomioivat mikroryhmäfissio- ja absorptiovaikutusalat tärkeille resonanssiabsorbaattoreille energioiden 10 ja 9118 eV välillä (Haugh ja Ferrer, 2015, 5). Itsesuojauksella tarkoitetaan ilmiötä, jossa neutronivuo vaimenee resonanssienergioiden läheisyydessä. Tämän seurauksena neutronien absorptionopeus resonanssivälin yli on pienempi verrattuna tilanteeseen, jossa resonanssia ei ole. Lisäksi CASMO5 ottaa itsesuojaatuissa vaikutusaloissa huomioon hilan heterogeenisen rakenteen. Energiaryhmän g itsesuojauksen huomioiva mikroryhmävaikutusala lasketaan neutronivuolla ϕ painotettuna integraalina edellä mainittuun energiaväliin kuuluvan energiaryhmän yli yhtälöstä:

$$\sigma_{a,g} = \frac{\int_{E_g}^{E_{g-1}} \sigma_a(E) \phi(E) dE}{\int_{E_g}^{E_{g-1}} \phi(E) dE}, \quad (3.1)$$

missä $\sigma_a(E)$ on neutronin energiasta E riippuva mikroskooppinen absorptiovaikutusala

(Haugh ja Ferrer, 2015, 7). Perusajatuksena resonanssien huomioimisessa on esittää resonanssiabsorbaattorin mikroryhmävaikutusalaa kuvaava yhtälö (3.1) vastaavan homogeenisen ongelman resonanssi-integraalien (energiasta riippuvien reaktionopeuksien energiaintegraalien) avulla, minkä jälkeen voidaan käyttää CASMO5:n sisäisistä resonanssi-integraalitulukoista interpoloituja homogeenisen ongelman resonanssi-integraalien arvoja mikroryhmävaikutusalojen laskentaan jokaiselle ohjelman määrittelemälle resonanssiabsorbaattorille (Haugh ja Ferrer, 2015, 7). Homogeenisen ongelman resonanssi-integraalien hyödyntämistä heterogeenisessä ongelmassa kutsutaan ”ekvivalenssiperiaatteeksi” (engl. equivalence principle³).

Resonanssilaskentaa mikroryhmävaikutusaloille ei ole tarpeellista tehdä, jos neutronidatkirjaston mikroryhmävaikutusalat kuvaavat resonanssit riittävän tarkasti. Tässä työssä käytetyssä CASMO5-ohjelman ydindatkirjastossa energiaryhmät energiavälillä 0,2... 10 eV välissä on valittu riittävän tiheästi, jotta erityistä resonanssilaskentaa ei tarvitse tehdä (Haugh ja Ferrer, 2015, 5).

3.1.2 Mikroryhmälasku yhdessä ulottuvuudessa

Resonanssit huomioivien mikroryhmävaikutusalojen laskemisen jälkeen, lasketaan mikroryhmävaikutusalat ja suoritetaan yksiulotteinen ”mikroryhmälasku” (engl. micro-group calculation) jakamalla laskettava hila sylinterin muotoisiin alueisiin ”sauvasoluihin”, joiden sisältö koostuu samankeskisistä sylinterinmuotoisista alueista, jotka kuvaavat hilan sauvakohtaisia materiaalialueita (esimerkiksi polttoainepelletti, suojakuori, jäädyte jne.). Neutronivuospektri lasketaan ensin erikseen jokaiselle alueelle yksiulotteisella törmäystodennäköisyyksiin perustuvalla menetelmällä käyttämällä ohjelman etukäteen muodostamia makroskooppisia vaikutusaloja, jotka on saatu kertomalla mikroryhmän mikrokooppisia vaikutusaloja mikroalueen atomitiheyksillä. Mikroryhmälaskun tuloksena saadaan neutronivuon spektri 586 energiapisteessä jokaiselle mikroalueelle. Mikroaluekohtaista neutronivuospektriä käytetään mikroryhmävaikutusalojen kondensoimiseen (engl. condensing) harvempaan energiaryhmärakenteeseen (tyypillisesti 19 energiaryhmää). Luomalla harvemman energiaryhmärakenteen vaikutusalat mahdollistaa koko hilan kattavan

³Ks. esimerkiksi (Bell ja Glasstone, 1970, 448)

transport-laskun tekemisen lyhyemmässä ajassa. (Haugh ja Ferrer, 2015, 10–11)

3.1.3 Transportyhtälön ratkaisu kahdessa ulottuvuudessa

Harvemman energiaryhmärakenteen vaikutusaloja käyttämällä CASMO5 ratkaisee karakteristikkamenetelmää (engl. method of characteristics) käyttämällä Boltzmannin ajasta riippumattoman transportyhtälön, joka voidaan energiaryhmässä g kirjoittaa muodossa:

$$\frac{d}{ds}\psi^g(\vec{r}, \hat{\Omega}) + \Sigma_{tr}^g\psi^g(\vec{r}, \hat{\Omega}) = Q^g(\vec{r}, \hat{\Omega}), \quad (3.2)$$

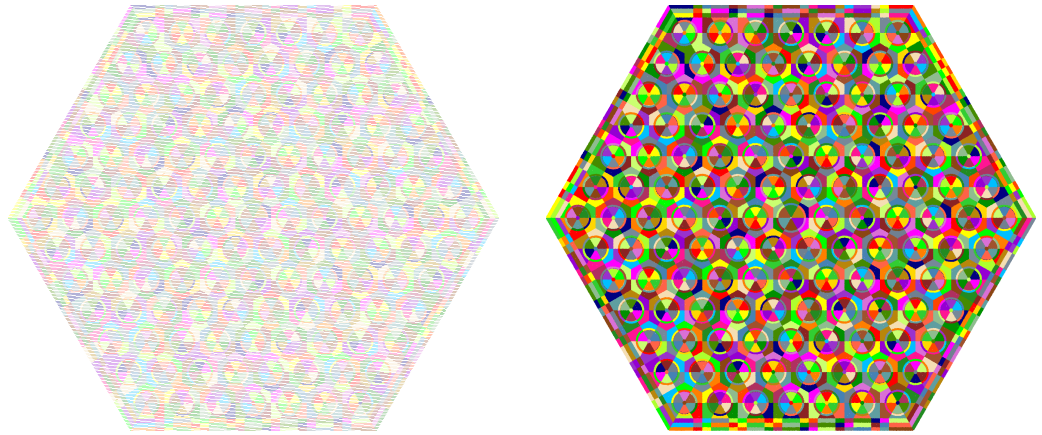
missä ψ on kulmavuo paikassa \vec{r} , ds differentiaalinen pituuselementti yksikkövektorin $\hat{\Omega}$ suuntaan, Σ_{tr} transportvaikutusala ja Q neutronilähde (Haugh ja Ferrer, 2015, 12). Kulmavuo ja neutronilähde kuvaavat suuntaan $\hat{\Omega}$ kulkevien neutronien lukumäärää yksikköpinta-alaa, yksikköavaruuskulmaa ja yksikköenergiaa kohti. Jos neutronien sallitaan liikkuvan ainoastaan suuntaan $\hat{\Omega}_m$, niin silloin yhtälöllä (3.2) on ratkaisu $\psi^g(\vec{r}, \hat{\Omega}_m)$ ainoastaan⁴ pitkin ”karakteristikasuoria” (engl. characteristic curve)

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + s\hat{\Omega}_m, \quad (3.3)$$

missä \vec{r}_0 on mielivaltainen vakiovektori ja suora sijaitsee kolmessa ulottuvuudessa.

CASMO5 jakaa ratkaistavan hilan alueisiin ja lävistää sen yhtälön (3.3) mukaisilla karakteristikkasuorilla käyttämällä eri suorille eri suuntia ja hilan reunalla sijaitsevia lähtöpiskeitä. Jokaisen alueen sisältämän materiaalin transportvaikutusala on laskettu mikroryhmälaskussa. CASMO5-ohjelman transportyhtälön ratkaisussa käyttämät alueet on havainnollistettu kuvassa 3 yksittäiselle polttoainepillelle. Yhtälö (3.2) ratkaistaan jokaisen alueen sisällä pitkin karakteristikkasuoria, joka läpäisee alueen. Ratkaisussa jokaisen alueen sisällä materiaalikoostumus ja energiaryhmän transport-vaikutusala oletetaan vakioiksi. (Haugh ja Ferrer, 2015, 12)

⁴Tämän voi nähdä kirjoittamalla ketjusäännön perusteella $\frac{d\psi}{ds} = \nabla\psi \cdot \frac{d\vec{r}}{ds}$ ja huomaamalla, että toisaalta $\frac{d\psi}{ds} = \nabla\psi \cdot \hat{\Omega}_m$, sillä $\frac{d\vec{r}}{ds}$ on kulmavuon suunnattu derivaatta vektorin $\hat{\Omega}_m$ suuntaan.



Kuva 3. CASMO5-ohjelman transporthytlön ratkaisussa käyttämät alueet heksagonaalisessa polttoainepussissa. Vasemmalla karakteristikasuorat piirrettynä yhteen suuntaan. Oikealla karakteristikasuorat piirrettynä kaikkiin ohjelman käyttämiin suuntiin. Kuvat on luotu CASMO5-ohjelmalla.

Transporthytlö esitetynä muodossa (3.2) kuvaa vakiokertoimista epähomogeenistä ensimmäisen kertaluvun lineaarista differentiaaliyhtälöä. CASMO5-ohjelman edeltäjässä CASMO-4E ja vanhemmissa CASMO5-versioissa on käytössä niin sanottu FS-approksimaatio (engl. flat source approximation), jossa lähdetermi $Q^g(\vec{r}, \hat{\Omega})$ on oletettu vakioksi alueen sisällä (Hykes et al., 2022b) (Ferrer et al., 2012). Käyttämällä integroivaa tekijää $\exp(\Sigma_{tr}^g s_m)$, missä s_m on karakteristikasuoran alueen sisällä kulkema matka, yhtälö (3.2) voidaan ratkaista integroimalla pitkin alueen läpäisevää karakteristikasuoraa. Integrointi on suoraviivainen ja tulos on

$$\psi^g(s_m) = \psi^g(0)e^{-\Sigma_{tr}^g s_m} + \frac{Q^g}{\Sigma_{tr}^g} \left(1 - e^{-\Sigma_{tr}^g s_m}\right), \quad (3.4)$$

missä $\psi^g(0)$ on alueen sisään tuleva kulmavuo, joka saadaan reunaehdoista tai edellisestä alueesta poistuvana kulmavuona. CASMO5 ratkaisee keskiarvoiset kulmavuot alueen sisällä vaatimalla, että keskiarvoinen kulmavuo säilyttää reaktionopeuden pitkin alueen läpäisevää karakteristikasuoraa. Keskiarvoiset kulmavuot ratkaistaan jokaisessa alueessa käymällä yksi kerrallaan läpi jokainen hilan läpäisevä karakteristikasuora. Kun keskiarvoiset kulmavuot tunnetaan, ratkaistaan neutronivuot jokaisessa alueessa keskiarvoisten kulmavuiden avulla kulmavuon suuntaintegraalia approksimoivana kvadratuureilla painotettuna summana. Tämän jälkeen yhtälön (3.2) lähdetermi päivitetään jokaisessa alueessa

ja prosessi alkaa alusta, kunnes sopiva konvergenssi on saavutettu. (Haugh ja Ferrer, 2015, 12)

FS-approksimaatioissa suuret alueet, joissa tapahtuu merkittävää sirontaa, tarvitsevat paljon laskenta-alueita, jotta lähdetermin paikkariippuvuus voidaan kuvata tarkasti (Haugh ja Ferrer, 2015, 13). Tässä työssä käytetyssä CASMO5-versiossa lähdetermille on FS-approksimaation sijasta käytössä niin sanottu LS-approksimaatio (engl. linear source approximation), jossa lähteen annetaan muuttua lineaarisesti pitkin karakteristika-suoraa (Ferrer et al., 2012). Kyseistä menetelmää käyttämällä voidaan nopeuttaa ohjelman suoritus-aikaa verrattuna FS-approksimaatioon (Haugh ja Ferrer, 2015, 13).

Yhtälöstä (3.4) on selvää, että transport-ongelman ratkaisu vaatii tietoa karakteristika-suorien alueiden sisällä kulkemista matkan pituuksista s_m . Tätä varten CASMO5 käyttää pituuksien määrittämiseen niin sanottua säteenjäljitysruutiinia, jonka pääpiirre on etsiä karakteristika-suorien ja alueita rajoittavien analyttisten käyrien leikkauspisteet. Säteenjäljitys tapahtuu ainoastaan hilatasossa. Neutronien liike hilatasosta pois päin huomioidaan laskemalla matkan pituudet ohjelman määrittämiin polaarikulmiin (hilatasossa polaarikulma on nolla). (Haugh ja Ferrer, 2015, 14)

3.1.4 Tuloksien tallentaminen

Transport-ongelman ratkaisemisen jälkeen CASMO5 laskee lukuisia eri tuloksia ja tallentaa ne ohjelman suorittamisen yhteydessä syntyvään ”cax”-tiedostoon (engl. card image file). Tulokset lasketaan ja tallennetaan cax-tiedostoon erikseen jokaisessa palamapisteessä. Kyseisestä tiedostosta löytyy suuri määrä ohjelman luomaa dataa, jonka määrä riippuu osittain siitä, mitä komentoja on käytetty CASMO5-ohjelman syötetiedostossa. Loviisan voimalaitoksen lataussuunnittelussa käytettävillä CASMO5-syötetiedostoilla syntyvät cax-tiedostot sisältävät satoja tuhansia rivejä (ihmisen suoraan luettavaa) dataa. Esimerkkejä cax-tiedostosta löytyvästä datasta ovat moniryhmävaikutusalat ja muut ryhmävakiot eri energiaryhmärakenteissa sauva ja nipputasolla, keskiarvoiset ja integroidut neutronivuot eri energiaryhmärakenteissa sauva- tai nipputasolla, reaktionopeudet polttoainenuklideille ja nipun epäjatkuvuustekijät sekä neutronien kinetiikkaparametrit. Cax-

tiedostosta poimittavia parametreja Loviisan voimalaitoksen lataussuunnittelussa käsitellään tarkemmin luvussa 4.

3.1.5 Uusien atomitiheyksien määrittäminen palamalaskussa

Viimeisessä vaiheessa CASMO5 suorittaa palamalaskun ”predictor-corrector”-menetelmällä. Ensin nykyisessä palama-askeleessa A ratkaistua neutronivuota käytetään seuraavaan palama-askeleen B atomitiheyksien ennustamiseen ratkaisemalla isotooppien atomitiheyksien tasapainoa kuvaavat Batemanin yhtälöt niin sanottua CRAM-menetelmää (Chebyshev Rational Approximation Method) (Pusa, 2011) käyttämällä (”predictor”-vaihe). Tämän jälkeen vaikutusalat päivitetään ratkaistuilla atomitiheyksillä ja neutronivuo seuraavassa palama-askeleessa B ratkaistaan predictor-vaiheen vaikutusaloilla. Seuraavaksi atomitiheydet palama-askeleessa B ratkaistaan uudestaan käyttämällä ratkaisussa palama-askeleen B neutronivuota ja palama-askeleen A atomitiheyksiä (”corrector”-vaihe). Seuraavan palama-askeleen B lopulliset atomitiheydet saadaan predictor- ja corrector-vaiheiden atomitiheyksien keskiarvona. Kyseistä keskiarvoa käytetään seuraavaksi uudessa predictor-vaiheessa, josta saadaan palama-askeleen B jälkeisen palama-askeleen C atomitiheydet neutronivuon ratkaisua varten. Batemanin yhtälöiden ratkaisussa käytetty CRAM-menetelmä on uusi lisäys CASMO5-ohjelmassa, eikä se ole käytössä CASMO-4E-ohjelmassa. Kun palamalasku on tehty eli atomitiheydet tunnetaan seuraavassa palamapisteessä, laskenta alkaa alusta resonanssien huomioivien mikroryhmävaikutusalojen laskennasta ja sykliä toistetaan kunnes haluttu kokonaispalama on saavutettu. (Haugh ja Ferrer, 2015, 15,17)

3.1.6 Koppipalamalaskenta Loviisan voimalaitoksella

Loviisan voimalaitoksella koppipalamaohjelman tarkoitus on luoda dataa, jota voidaan hyödyntää nodaaliohjelmassa sekä sauvatehojen rekonstruktio-ohjelmassa. Loviisan voimalaitoksella koppipalamaohjelman tekemä laskenta tehdään yhden polttoainepinon laskuna, toisin sanoen koppipalamaohjelma olettaa, että laskettavaa polttoainepinua ym-

päroä ääretön hila samanlaisia nippuja ja nippuhila jatkuu aksiaalisuunnassa äärettömästi. Tällöin nettoneutronivuoto polttoainennippujen välillä on nolla. Todellisessa reaktorisydämessä neutronien nettovuotoa kuitenkin tapahtuu, mikä on huomioitava sydäntason simulaatio-ohjelmille luodussa datassa. CASMO-ohjelmat säätävät ratkaistun neutronivuon spektriä niin sanotussa perusmoodilaskussa (engl. "fundamental mode calculation") (Haugh ja Ferrer, 2015, 15).

Yleisesti kuvattuna perusmoodilaskussa ratkaistua äärettömän hilan tiheän energiaryhmärakenteen neutronivuospektriä käytetään ryhmävakioiden luomiseen diffuusioyhtälöön, jossa materiaalikupevuus ei ole nolla. Diffuusioyhtälön materiaalikupevuutta säädetään, kunnes äärellisen hilan efektiivinen kasvutekijä saa ykköstä lähellä olevan arvon. Tuloksena saadaan tällöin äärellisen hilan harvan energiaryhmärakenteen neutronivuospektri, jolla äärettömän hilan tiheän energiaryhmärakenteen neutronivuospektriä "säädetään" ottamaan huomioon neutronivuodon vaikutuksen. Kyseinen säädetty neutronivuo on lopullinen vuo, jota käytetään esimerkiksi ryhmävakioiden vuopainotuksessa ja palamalaskussa. Huomionarvoisena poikkeuksena CASMO-ohjelmassa ovat epäjatkuuustekijät, joiden laskemiseen käytetään äärettömän hilan neutronivuospektriä (Hykes et al., 2022a, 135). (Knott ja Yamamoto, 2010, 935)

Laskentaa varten CASMO-ohjelmalle annetaan syötetiedosto, joka sisältää tiedot polttoainenipun geometrisista mitoista, komponenttien tiheyksistä sekä nuklidien massaosuuksista. Lisäksi syötetiedostoissa määritetään sauvahilan väkevöintiprofilointi ja reaktoriolosuhteita vastaavat tilamuuttujat äärettömässä hilassa. Tilamuuttujien määrittely tarkoittaa paineen, polttoainenipun komponenttien lämpötilojen, tehotiheyden sekä paineen asettamista. Lopuksi syötetiedostoon annetaan komennot, joiden perusteella CASMO tulostaa lasketun datan luvussa 3.1.4 mainittuun cax-tiedostoon. Laskenta CASMO-ohjelmalla toistetaan useilla eri tilamuuttujilla, jotta dataa saadaan todellisen reaktorisydämen simuloimiseen useassa eri tilassa. CASMO-laskentaa käsitellään enemmän luvussa 4.1.

3.2 HEXBU-3D

Loviisan voimalaitoksen ydinteknisessä suunnittelussa ja reaktorivalvonnassa reaktorin kolmiulotteisen tehojakauman ja kriittisen booripitoisuuden laskeminen tehdään kaksieneryhmäisellä nodaalimenetelmään perustuvalla ohjelmalla HEXBU-3D (Kaloine et al., 1981), joka on alun perin suunniteltu säännöllisen kuusikulmion muotoisia polttoainepiippuja käyttävän VVER-440-reaktorin analysointiin. Tässä työssä on käytetty ohjelmaversiota HEXBU-3D/MOD5.3.0. Nodaalimenetelmässä reaktorisydämen polttoainepiiput jaetaan aksiaalisuunnassa kolmiulotteisiin noodeihin, jotka homogenisoidaan erikseen luotuja ryhmävakioita käyttämällä. Ryhmävakioiden avulla monimutkaiset neutronien paikasta, suunnasta ja energiasta riippuvat reaktionopeudet heterogeenisessa hilassa voidaan kuvata vastaavat reaktionopeudet tuottavana homogenisoituna alueena, jossa neutroniikan paikka- ja suuntariippuvuutta ei ole ja jatkuva energiariippuvuus on diskretisoitu termiseksi ja nopeaksi eneryriymäksi.

HEXBU-3D-ohjelman ratkaisumenetelmä perustuu noodien sisäisten neutronivuojakaumien selvittämiseen noodikohtaisista kaksiryhmädiffuusioyhtälöistä. Säätosauvojen ja reaktorin ulkoreunojen kuvaamiseen käytettäviä albedoja lukuun ottamatta Loviisan voimalaitoksen laskentajärjestelmässä diffuusioyhtälöiden ryhmävakiot on laskettu CASMO-ohjelmistoilla. Tämän työn kirjoittamisen aikana tuotannossa on käytetty CASMO-4E-ohjelmaa. Seuraavaksi kuvataan yleisellä tasolla HEXBU-3D-ohjelman tärkeimpiä piirteitä. On syytä huomioida, että esitetty kuvaus ei ole läheskään kattava ja tarkka metodologia löytyy esimerkiksi viitteestä (Kaloine et al., 1981).

3.2.1 Neutronivuojakauman ratkaisu

Tässä esitetty ratkaisumenetelmän kuvaus on referoitu viitteestä (Siltanen, 1990). HEXBU-3D jakaa reaktorisydämen noodeihin ja ratkaisee jokaiselle noodille paikasta \vec{r} riippuvat kaksiryhmädiffuusioyhtälöt:

$$\begin{aligned}
-D_1 \nabla^2 \phi_1(\vec{r}) + (\Sigma_{a,1} + \Sigma_{\text{rem}}) \phi_1(\vec{r}) &= \frac{1}{k_{\text{eff}}} [\nu \Sigma_{f,1} \phi_1(\vec{r}) + \nu \Sigma_{f,2} \phi_2(\vec{r})] \\
-D_2 \nabla^2 \phi_2(\vec{r}) + (\Sigma_{a,2}^0 + C_B \Sigma_{a,B}) \phi_2(\vec{r}) &= \Sigma_{\text{rem}} \phi_1(\vec{r}),
\end{aligned} \tag{3.5}$$

missä $\Sigma_{a,2}^0$ on termisen ryhmän absorptiovaikutusala ilman booria, Σ_{rem} poistovaikutusala, C_B jäähdytteen boorikonsentraatio, ν fissiossa keskimäärin syntyvien neutronien määrä, D_g , $\Sigma_{a,g}$ ja $\Sigma_{f,g}$ vastaavasti ryhmän g diffuusiovakio, absorptio- ja fissiovaikutusala ja $\Sigma_{a,B}$ boorin absorptiovaikutusala per boorin yksikkökonsentraatio. Termi k_{eff} on efektiivinen kasvutekijä. Käytännössä reaktorisydämen noodijaossa sekä kiinteät polttoaineputket että polttoainejatket jaetaan aksiaalisuunnassa kymmeneen yhtä korkeaan noodiin. Lähtökohtainen oletus diffuusio-ongelman (3.5) ratkaisumenetelmässä on, että nopean ja termisen vuon paikkariippuvuus voidaan jokaisessa noodissa kuvata asymptoottista osaa ja transienttiosaa kuvaavien Helmholtzin yhtälön toteuttavien ominaisfunktioiden f_1 ja f_2 lineaarikombinaatioina:

$$\begin{aligned}
\phi_1(\vec{r}) &= f_1(\vec{r}) + R_2 f_2(\vec{r}) \\
\phi_2(\vec{r}) &= R_1 f_1(\vec{r}) + f_2(\vec{r}),
\end{aligned} \tag{3.6}$$

missä R_1 ja R_2 ovat kaksiryhmävaikutusaloista riippuvia kertoimia. Transienttiosan f_2 oletetaan olevan verrannollinen eksponenttifunktioon, joka on nolla usean keskiarvoisen vapaamatkan päässä noodin reunoista. Asymptoottiosan f_1 oletetaan muuttuvan hitaasti paikan funktiona noodin sisällä, jolloin se voidaan approksimoida kolmannen asteen polynomien f_{xy} ja f_z tulona, missä f_{xy} kuvaa horisontaalista ja f_z aksiaalista riippuvuutta. Asymptoottisen osan voidaan olettaa muuttuvan hitaasti, koska ominaisarvo B_1^2 on tyypillisesti pieni ja se ilmaisee neutronivuon asymptoottisen osan kupevuutta noodin sisällä Helmholtzin yhtälön $\nabla^2 f_1 = -B_1^2 f_1$ kautta. Jokaisessa noodissa on ratkaistavana 22 tuntematonta kerrointa: 12 kerrointa asymptoottiosaa kuvaavalle polynomille, 8 kerrointa transienttiosaa kuvaavalle eksponenttifunktiolle ja 2 kerrointa asymptootti- ja transienttiosaa vastaaville ominaisarvoille B_1^2 ja B_2^2 . Tuntemattomat kertoimet ratkaistaan vaatimalla, että jokaisessa noodissa asymptoottinen osa toteuttaa edellä mainitun Helmholtzin yhtä-

lön. Lisäksi vaaditaan, että keskiarvoiset ryhmävuot ja -virrat ovat jatkuvia noodien välisillä pinnoilla. Keskiarvoisten neutronivoiden jatkuvuusehto on nykyisin käytössä olevalla HEXBU-3D-ohjelmaversiolla korvattu ehdolla, jonka mukaan epäjatkuvuustekijöillä painotetut keskiarvoiset neutronivuot ovat jatkuvat kahden noodin välisellä pinnalla (Kaloinen, 1993, 2). Epäjatkuvuustekijät lasketaan muiden ryhmävakioiden tavoin HEXBU-3D-ohjelmalle CASMO-ohjelmalla.

Diffuusioyhtälön (3.5) ryhmävakiot lasketaan CASMO-ohjelmalla ja ne asetetaan HEXBU-3D:n syötetiedostoon periaatteessa noodipalamien mukaan järjestettynä taulukkona, josta noodipalamaa vastaavat ryhmävakiot saadaan interpoloimalla. HEXBU-3D-laskenta sisältää siis tyypillisesti diffuusioyhtälön ratkaisun lisäksi palamalaskennan, jossa noodipalamia päivitetään vastaamaan tuotettua energiaa. Ryhmävakioiden laskentaa CASMO-ohjelmalla käsitellään enemmän luvussa 4.

Tässä työssä käytetty HEXBU-3D/MOD5.3.0-versio olettaa, että sen ryhmävakiot sisältävässä syötetiedostossa sekä jatkenipuilla että kiinteillä nipuilla on samat sydämen aktiivikorkeutta vastaavat uranimassat. Ohjelma skaalaa jatkeiden uranimassoja ohjelmalle määritettyjen jatkekorkeuden ja täyden sydämen aktiivikorkeuden suhteella. Nykyään jatkekorkeus on 238 cm ja sydämen aktiivikorkeus on 250 cm. Tämän vuoksi on palamalaskennan kannalta erittäin tärkeää, että jatkeelle annetaan syötetiedostoon uranimassa, joka saadaan skaalaamalla sen oikeaa uranimassaa kertoimella 250/238. Tällä menetelmällä palamalaskussa käytetään jatkeen oikeaa uranimassaa.

3.2.2 Takaisinkytkentöjen mallintaminen

Tässä työssä käytetty HEXBU-3D-versio kykenee mallintamaan viiden erilaisen tilamuuttujan muutoksista seuraavat takaisinkytkennät: polttoaineen lämpötila, jäähdytteen tiheys ja lämpötila, booritiheys (jäähdytteen tiheyden ja boorikonsentraation tulo) sekä materiaalikupevuus (Kaloinen, 1992, 8). Materiaalikupevuuksia ei käytetä Loviisan voimalaitoksen laskentajärjestelmässä, koska laskennan reunaehdot on määritelty albedojen avulla. Takaisinkytkennät mallinnetaan muuttamalla ryhmävakioita ennalta määritettyjen polynomisovitteiden avulla. Kertoimet polynomisovitteisiin lasketaan CASMO- sekä jäl-

kikäsittelyohjelmilla ja ne asetetaan HEXBU-3D-ohjelmalle syötetiedostossa. HEXBU-3D huomioi takaisinkytkennät neutronivuojakauman ratkaisussa tapahtuvien ulkoiteraatioiden aikana päivittämällä ryhmävakioita seuraavaa iteraatiokierrosta varten (Siltanen, 1990, 23).

HEXBU-3D:n laskennassa oletetaan, että ksenonin ja samariumin atomitiheydet ovat aina tasapainotilassa, nollassa tai vakioarvossa. Jos oletuksena on tasapainotila, neutronivuojakauman muuttuessa HEXBU-3D korjaa termisen ryhmän absorptiovaikutusaloja tehotiheyden perusteella vastaamaan arvoja, jotka niillä on uutta neutronivuojakaumaa vastaavassa tasapainotilassa (Kaloinen, 1992, 6). Näin ollen HEXBU-3D kykenee mallintamaan tehomuutoksista aiheutuvan muutoksen ksenonin ja samariumin atomitiheyksissä. HEXBU-3D tekee xenon- ja samariumkorjauksen termisen ryhmän absorptiovaikutusaloihin yhdessä muiden takaisinkytkentäkorjausten kanssa jokaisen ulkoiteraation aikana (Kaloinen, 1992, 6). Kaikkien takaisinkytkentöjen mallintamista on kuvattu lisää luvussa 4.1.

Takaisinkytkentöjen laskentaan tarvitaan tiedot jäähdytteen tiheydestä ja lämpötilasta sekä polttoaineen lämpötilasta. Kyseiset suureet lasketaan syötetiedostoon määritettyjen polynomisovitteiden avulla. Käytännössä jäähdytteen tiheys ja lämpötila interpoloidaan entalpien funktiona syötetiedostoon määritetystä veden termodynaamiset ominaisuudet sisältävästä taulukosta (Rintala, 2016, 23). Polttoaineen lämpötila interpoloidaan tehotiheyden funktiona samankaltaisesti (Rintala, 2016, 24).

Tässä yhteydessä mainitaan vielä, että HEXBU-3D sisältää ominaisuuden, jolla voidaan ottaa huomioon jäähdytteen historiallisen tiheyden vaikutus HEXBU-3D:n käyttämiin ryhmävakioihin ja ryhmävakioiden takaisinkytkentöihin (Kaloinen, 1992, 14). Polttoainennippujen ryhmävakiot lasketaan CASMO-ohjelmalla käyttämällä vakiolämpötilaa jäähdytteelle kaikkiin suuntiin äärettömässä hilassa. Tällöin siis ryhmävakiot kuvaavat aksiaalisuunnassa äärettömän pitkää nippua, jossa jokaisella aksiaalikorkeudella jäähdytteen (ja moderaattorin) tiheydellä on sama historiallinen arvo. Todellisuudessa näin ei ole, sillä sydämen alaosaan tuleva jäähdyte on kylmempää kuin sydämen yläosasta lähtevä jäähdyte ja siten sydämen jäähdytteen tiheysgradientti osoittaa keskimääräisesti kohti sydämen alaosaa. Tästä seuraa, että neutronivuon energiaspektri on kovempi sydämen yläosassa kuin alaosassa. Erilainen energiaspektri eri sydämen aksiaalitasoilla tuottaa aksiaalitasoil-

le erilaiset nuklidihistoriat palaman funktiona; erityisesti plutoniumia tuotetaan enemmän sydämen yläosassa kuin alaosassa yläosan kovemman energiaspektrin takia. HEXBU-3D määrittää eri aksiaalitasoilla sijaitseville noodeille jokaisessa palamapisteessä jäädytteen historiallisen tiheyden, joka on yksinkertaisimmillaan noodin jäädytetiheyden palamapainotettu keskiarvo (Kaloinen, 1992, 15). Tämän jälkeen noodien kaksiryhmävakiot ja takaisinkytkentöihin tarvittavat polynomikertoimet interpoloidaan taulukoista, joissa kyseiset parametrit on esitettyinä eri keskiarvoisilla historiallisilla jäädytetiheyksillä (Kaloinen, 1992, 14). Loviisan voimalaitoksen laskentajärjestelmissä tiheyskorjausta ei kuitenkaan käytetä. Esimerkiksi tehotilaa kuvaavat ryhmävakiot lasketaan ainoastaan yhdellä jäädytteen (ja moderaattorin) historiallisella lämpötila-arvolla.

3.2.3 Reunaehdot ja mallinnusvirhe

Sydämen neutroneita heijastavat reunat radiaali- ja aksiaalisuunnassa sekä neutroneita absorboivat säätösauvojen absorbaattoriosat on mahdollista kuvata HEXBU-3D-ohjelmassa albedojen avulla. Tätä reunaehto- ja kuvausmenetelmää käytetään Loviisan voimalaitoksella (toinen epätarkempi vaihtoehto olisi käyttää ekstrapolaatiopituuksia). Albedot kuvaavat heijastusnoodista sydämeen palaavien ja heijastusnoodiin poistuvien neutronivirtojen suhdetta. Heijastusnoodilla tarkoitetaan sydämen reunaa tai säätösauvan absorbaattoriosaan kuuluvaa noodia. Energiaryhmiä on käytössä kaksi, joten yhteensä tarvitaan neljä albedoa kuvaamaan heijastusta kaikkien energiaryhmäkombinaatioiden suhteen. Vanhemmissa HEXBU-3D-versioissa on ollut käytössä niin sanottu kokonaisalbedomalli, jossa heijastusnoodin kaikkia pintoja kuvataan samoilla kokonaisalbedoilla. Kokonaisalbedot kuvaavat heijastusnoodista sirontojen takia tietyssä energiaryhmässä palaavien neutronivirtojen ja heijastusnoodiin tietyssä energiaryhmässä poistuvien neutronivirtojen suhdetta.

Nykyisin Loviisan voimalaitoksella käytössä olevassa HEXBU-3D-versiossa on käytössä niin sanottu osittaisalbedomalli, jossa heijastusnoodille annetaan osittaisalbedot, joiden avulla huomioidaan neutronien heijastuminen vain tiettyjen pintojen välillä. Mallissa määritellään neljä erityyppistä neutronivirtaa sen mukaan, minkä pinnan läpi neutronit poistuvat heijastusnoodiin ja palaavat heijastusnoodista: kun neutronit poistuvat mielival-

taisen pinnan läpi heijastinnoodiin, tällöin esimerkiksi ”A-neutronivirta” on virta, joka palaa sydämeen saman pinnan läpi, ”B-neutronivirta” virta, joka palaa sydämeen jomankumman viereisen pinnan läpi ja niin edelleen. Mallissa heijastumista tiettyjen pintojen välillä kohdellaan keskiarvoisessa mielessä siten, että esimerkiksi ”A-osittaisalbedo” kuvaa keskimääräistä A-neutronivirran palaavan virran ja poistuvan virran suhdetta kahden energiaryhmän välillä (niitä tarvitaan siis neljä yhtä heijastusnoodia kohti). Osittaisalbedojen avulla voidaan määrittää niin sanotut efektiiviset albedot, joita voidaan käyttää analogisesti kuten kokonaisalbedoja. Lisäksi HEXBU-3D:n käyttämässä osittaisalbedomallissa albedot voivat riippua boorikonsentraatiosta sekä jäähdytteen tiheydestä. Loviisan voimalaitoksella albedot on määritelty usealle eri boorikonsentraatiolle ja jäähdytteen tiheydelle, jolloin puhutaan laaja-alaisista albedoista. Kokonais- ja osittaisalbedojen laskennassa on käytetty Serpent 2- ja MCNP-ohjelmia. Loviisan voimalaitoksella käytettyjä albedoja on käsitelty perusteellisemmin viitteissä (Anttila et al., 2004) ja (Valtavirta ja Rintala, 2019).

Tässä työssä käytetyssä HEXBU-3D/MOD5.3.0-versiossa oletetaan, että kun säätösauvan absorbaattoriosia (ks. luku 2) on kokonaan vedettynä sydäimestä, niin polttoainejatkeen pellettipatsaan alareuna on samalla tasolla kuin kiinteän polttoainenipun pellettipatsaan alareuna (Kuopanportti, 2019, 2). Nykyisin Loviisan voimalaitoksella käytetyllä polttoaineella tämä ei kuitenkaan toteudu, vaan sydämen kohdalla sijaitsevan polttoainejatkeen pellettipatsaan alareuna on 6 cm kiinteän polttoainenipun pellettipatsaan alareunan yläpuolella. Tämä tarkoittaa, että HEXBU-3D ei täysin onnistu kuvaamaan nykyisin Loviisan voimalaitoksella käytettyjen polttoainejatkeiden ylä- ja alapäiden geometriaa oikein, kun laskennassa käytetään jatkeen todellista pituutta. Todellisen jatkeen pituuden käyttäminen efektiivisesti tarkoittaa, että laskennassa jatkeen pellettipatsaan alareuna siirtyy samalle tasolle kuin kiinteän nipun alareuna. Tällöin jatkeen yläosan ja jatkeen yläosaan yhteydessä olevan absorbaattoriosan väliin jää 6 cm aukko, joka oletetaan albedojen avulla täydellisesti neutroneja heijastavaksi osaksi jatkeen yläpuolella olevaa absorbaattoriosaa. Mallinnusvirheen korjauksien tarkkuutta on tutkittu tarkemmin viitteessä (Kuopanportti, 2019).

3.3 ELSI-1440

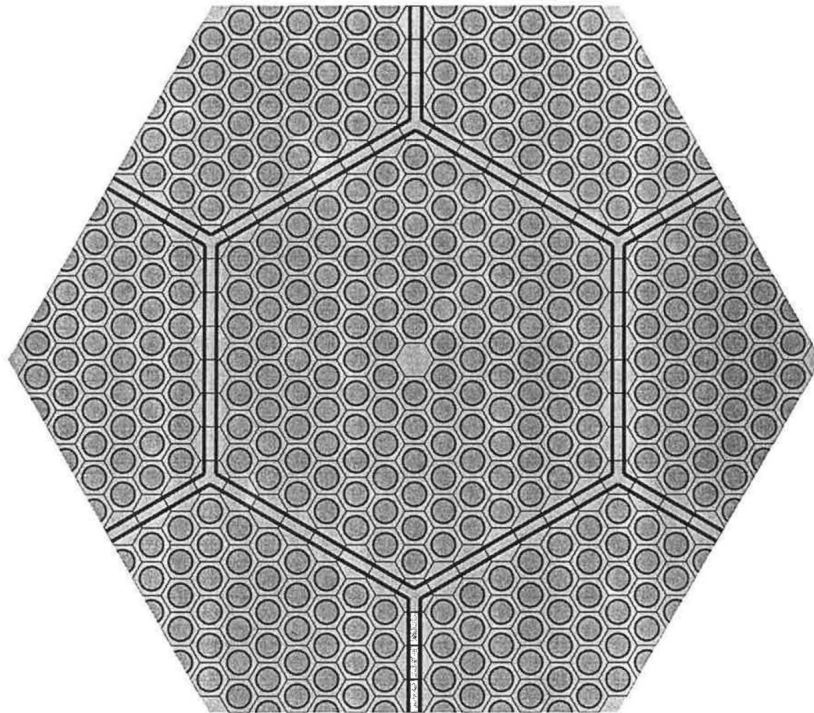
Nodaaliohjelman ratkaiseman tehojakauman resoluutio ulottuu ainoastaan nooditasolle, jolloin nippujen sisäisiä tehojakaumia sauvatasolla ei tunneta. Tietoa sauvakohtaisista tehojakaumista kuitenkin tarvitaan, jotta kaikkien oleellisten termohydraulisten suureiden termiset marginaalit voidaan määrittää (Vehmaanperä, 2020, 23). Laskettavia termohydraulisia suureita käsitellään luvussa 3.4.3. Termohydraulisten suureiden laskenta edellyttää, että nippujen sisäiset sauvakohtaiset neutronivuojakaumat täytyy rekonstruoida jokaisessa sydämen nippunoodissa sen jälkeen, kun tehojakauma on selvitetty nooditasolla HEXBU-3D-ohjelmalla. ELSI-1440 (Kuusisto, 1997) on lataussuunnittelussa sekä reaktorivalvonnassa käytetty HEXBU-3D:n kanssa integroitu ohjelma, joka toteuttaa sauvatehojen rekonstruktion. Tässä luvussa on esitetty lyhyesti ELSI-1440-ohjelman kuvaus. Metodologia on pääosin referoitu viitteestä (Kuusisto, 1997).

3.3.1 Laskenta-alue sauvatehojen ratkaisemista varten

ELSI-1440-ohjelman laskenta-alue on esitetty kuvassa 4. Laskenta-alue koostuu kaksiulotteisesta keskusnoodista, jolle sauvatason tehojakauma määritetään sekä sen kuudesta naapurista, joita käytetään laskenta-alueen reunaehtojen asettamisessa sekä keskusnoodin sauvakoppien fysiikan kytkemisessä läheiseen reaktoriympäristöön. ELSI-mallissa siis oletetaan, että sauvakohtaiset tehojakaumat eivät merkittävästi muutu HEXBU-3D-ohjelmassa käytetyn laskentanoodin sisällä aksiaalisuunnassa (esimerkiksi kiinteän nippunoodin pituus aksiaalisuunnassa on nykyään käytössä olevalla polttoaineella 25 cm). Kuvan 4 laskenta-alueesta voidaan erottaa neljä periaatteessa erilaista laskentakoppia: sauvakoppi (sisältää polttoainepelletin), keskusputkea vastaava koppi sekä nippujen välistä aluetta kuvaavat kopit, joista toinen on yhteinen kahdelle nipulle ja toinen kolmelle nipulle. Jos keskusnoodi sijaitsee sydämen reunalla tai säätösauvan absorbaattoriosan vieressä, osa naapurinoodista on sydämen reunaa tai absorbaattoriosaa vastaavia ”heijastinnoodia”. Heijastinnoodien laskentakopit ovat viides ja viimeinen laskentakoppityyppi.

ELSI-mallissa oletetaan, että jokaisen laskentakopin pinta-ala on sama. Todellisuudessa

tämä malli ei päde nippujen väliselle alueelle, sillä nippujen välistä aluetta ei voida täyttää kuten kuvassa 4. Lisäksi ryhmävakiolaskennassa käytetty CASMO-ohjelma käyttää eri pinta-alaa kulmassa sijaitsevalle sauvakopille kuin muille sauvakopeille. Nämä epäjohdonmukaisuudet on huomioitava ryhmävakioiden jälkikäsitelyssä, johon palataan luvussa 4.



Kuva 4. ELSI-1440-ohjelmassa käytetty laskenta-alue. Kuva kopioitu lähteestä (Kuusisto, 1997, 12).

3.3.2 Sauvataso tehojakauman ratkaisu

Laskenta-alueen nopea ja terminen tehojakauma jokaiselle laskentakopille ratkaistaan kaksiryhmädiffuusioyhtälöistä

$$\begin{aligned}
 -D_1 \nabla^2 \phi_1(\vec{r}) + (\Sigma_{a,1} + \Sigma_{\text{rem}}) \phi_1(\vec{r}) &= \nu \Sigma_{f,1} \phi_1(\vec{r}) + \nu \Sigma_{f,2} \phi_2(\vec{r}) \\
 -D_2 \nabla^2 \phi_2(\vec{r}) + \Sigma_{a,2} \phi_2(\vec{r}) &= \Sigma_{\text{rem}} \phi_1(\vec{r}),
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

missä esitetyt termit on määritelty yhtälölle (3.5). Yhtälön (3.7) ratkaisu edellyttää, että homogenisoitujen laskentakoppien kaksiryhmävakiot on määritetty jokaiselle kuvan 4 laskentakopille. Tämä pätee myös, jos jokin naapurinoodeista on heijastinnoodi. Ei-heijastinnoodien laskentakopeille ryhmävakiot lasketaan CASMO-ohjelmalla. Jos polttoainesauvat on asetettu nippuun siten, että ne noudattavat 30 asteen rotaatiosymmetriaa, yhden noodin kaikkien laskentakoppien ryhmävakiot poimitaan 30 asteen symmetriasektorista. Loviisan voimalaitoksella on käytetty ainoastaan polttoainennippuja, joissa on 30 asteen rotaatiosymmetria (Vehmaanperä, 2020, 23). Heijastinnoodien laskentakopeille ELSI-1440 laskee efektiiviset kaksiryhmävakiot syötetiedostossa määritettyjen kokonaisalbedojen avulla (albedoja on käsitelty luvussa 3.2.3).

Jokaisen laskentakopin ryhmävakiot asetetaan ELSI-1440-ohjelman syötetiedostoon periaatteessa sauvapalaman mukaan järjestettynä taulukkona, josta palamaa vastaava arvo voidaan interpoloida laskentakopille. Myös polttoainetta sisältämättömien laskentakoppien ryhmävakiot järjestetään palaman mukaan, mutta sauvapalaman sijasta käytetään interpoloinnissa nippupalamia. ELSI-1440 päivittää sauvapalamat noodin sauvakopeille (ts. laskentakopeille joissa on polttoainetta) ratkaistun tehojakauman perusteella. Ryhmävakiot saadaan siis noodin laskentakopeille ELSI-ohjelmassa samankaltaisesti kuten kokonaisille noodeille HEXBU-ohjelmassa. Ainoa takaisinkytkentä, joka huomioidaan ELSI-1440 ryhmävakioiden korjauksissa eksplisiittisesti, on muutos boorikonsentraatiossa, joten tässä suhteessa HEXBU- ja ELSI-ohjelmat eroavat. Muut takaisinkytkennät sisältyvät kuitenkin epäsuorasti ELSI-ohjelmaan, koska se hyödyntää HEXBU-3D:n ratkaisemia nopean vuon arvoja noodin sauvatehojen laskennassa.

Laskenta-alueen reunaehdot tarvitaan sekä nopealle että termiselle neutronivuolle. Reunaehtoien määrittämisessä ELSI-1440 hyödyntää niin sanottua nopean vuon interpolaatiomenetelmää sekä HEXBU-3D-ohjelman laskemia noodikohtaisia keskimääräisiä nopean vuon arvoja. ELSI-1440 laskee nopean vuon arvon keskusnoodin keskellä käyttämällä HEXBU-3D:n laskemaa keskiarvoista nopean vuon arvoa sekä materiaalikupevuutta, joka on johdettu noodikohtaisista kaksiryhmävakioista, jotka määritetään HEXBU-3D:n syötetiedostossa ja interpoloidaan noodipalaman funktiona. Samalla periaatteella lasketaan nopean vuon arvo myös muiden ei-heijastinnoodien keskellä. Pääidea on kehittää nopea vuo kahdeksan ennalta määritetyn alkeisfunktion lineaarikombinaationa. Nopeaa vuota

esittävän linearikombinaation kahdeksan tuntematonta kerrointa saadaan vaatimalla, että seuraavat ehdot toteutuvat: 1) Linearikombinaation keskiarvon keskusnoodin keskellä on oltava sama kuin HEXBU-3D:n laskeman nopean vuon arvo keskusnoodissa, 2) linearikombinaation arvon naapuroivien ei-heijastinnoodien keskellä on oltava sama kuin materiaalikupevuuden avulla lasketun nopean vuon arvo ei-heijastinnoodien keskellä ja 3) linearikombinaation on toteutettava Helmholtzin yhtälö keskusnoodin keskellä. Jos naapuroiva noodi on heijastinnoodi, sille ei ole laskettu keskiarvoista nopean vuon arvoa HEXBU-3D-ohjelmalla, jolloin ehtoa 2) ei voida käyttää. Tällöin ehto 2) korvataan ehdolla, jonka mukaan linearikombinaatio menee nolnaan yhden ekstrapolaatiopituuden päässä heijastinnoodin reunasta. Ekstrapolaatiopituus johdetaan heijastinnoodin kokonaisalbedojen ja keskusnoodin kaksiryhmävakioiden avulla.

Jos keskusnoodia naapuroi ei-heijastinnoodi, nopean vuon reunaehto on, että se on laskenta-alueen reunalla sama kuin nopean vuon interpolaatiomenetelmällä ratkaistu nopea vuo. Termiselle vuolle reunaehto on, että se menee nolnaan yhden ekstrapolaatiopituuden päästä laskenta-alueen reunasta. Ekstrapolaatiopituuden oletetaan olevan sama termisellä ja nopealla vuolla. Tällöin ekstrapolaatiopituus termiselle vuolle voidaan laskea ekstrapolaatiopituuden määritelmästä

$$d = -\frac{\phi_1(\vec{r})}{\nabla\phi_1(\vec{r})} \quad (3.8)$$

käyttämällä nopean vuon arvoja. Käytännössä yhtälö (3.8) approksimoidaan eri tavoilla jokaiselle erityyppiselle reunassa sijaitsevalle laskentakopille. Kuvasta 4 voidaan erottaa kolme erilaista reunassa sijaitsevaa kappaletta: yksi alueen kulmissa ja kaksi alueen suorilla reunoilla. Jos keskusnoodia naapuroi heijastinnoodi, reunaehdot heijastinnoodin reunan laskentakopeille saadaan määrittämällä neutronivirtavektorin reunan normaalin suuntaiset komponentit. Komponentit riippuvat nopean ja termisen vuon arvoista sekä heijastinkopin albedoista.

Diskretisoimalla kaksiryhmädiffuusioyhtälöt (3.7), saadaan diffuusioyhtälöitä approksimoivat matriisiyhtälöt, joista nopeaa ja termistä vuota approksimoivat vuovektorit voidaan ratkaista jokaiselle laskentakopille. Käytännössä vuovektorit ratkaistaan iteroimalla. Tällöin siis matriisiyhtälö ratkaistaan ilman eksplisiittistä käänteismatriisin etsintää. Ite-

raatiota kiihdytetään ylirelaksaatioparametrien avulla. Iterointia varten tarvitaan alkuarvaus nopealle ja termiselle vuovektorille. ELSI-1440 käyttää alkuarvauksena joko aikaisemmin laskettuja vuoarvoja, jos laskenta-alue sisältää naapuroivia noodeja, joille laskenta on tehty tai interpoloitua nopeaa vuota, jos aikaisemmin laskettuja arvoja ei ole. Jälkimmäisessä tapauksessa terminen vuo lasketaan hyödyntämällä interpoloitua nopeaa vuota ja olettamalla asymptoottisen nopean ja termisen vuon suhteeksi:

$$\frac{\phi_1(\vec{r})}{\phi, 2(\vec{r})} = \frac{\Sigma_{\text{rem}}}{\Sigma_{a,2}}. \quad (3.9)$$

Kun vuo jakauma on saatu rekonstruoitua, tehojakauma lasketaan yhtälöstä:

$$q = \varepsilon \Sigma_{f,1} \phi_1 + \varepsilon \Sigma_{f,2} \phi_2, \quad (3.10)$$

missä $\varepsilon \Sigma_{f,i} \phi_i$ on ryhmän i tehovaikutusala (keskimääräisen fissiossa vapautuneen energian ja fissiovaikutusalan tulo). Tehovaikutusalat ovat CASMO-ohjelman laskemia ja annetaan ELSI-1440:lle syötteenä kuten muutkin ryhmävakiot.

ELSI-1440 ottaa sauvatason tehojakauman määrittämisessä huomioon niin sanotun liikkuvan fissioenergian osuuden. Liikkuvalla fissioenergialla tarkoitetaan energiaa, joka kulkeutuu pois fissiopaikalta nopeiden neutronien ja gammasäteilyn (mukaan lukien kaappausgammat) kuljettamana. Liikkuvan fissioenergian huomioiva sauvatason tehojakauma on tasaisempi kuin vastaava tehojakauma, jossa liikkuvaa fissioenergiaa ei huomioida. Liikkuva fissioenergia otetaan huomioon liikkuvan fissioenergian osuudella γ ja fissioenergian tehovaikutusalalla $\varepsilon \Sigma_\gamma$, joiden avulla yhtälön (3.10) sijaan tehojakauma lasketaan yhtälöstä:

$$q = (1 - \gamma)(\varepsilon \Sigma_{f,1} \phi_1 + \varepsilon \Sigma_{f,2} \phi_2) + \gamma \varepsilon \Sigma_\gamma \phi_1. \quad (3.11)$$

Fissioenergian tehovaikutusala $\varepsilon \Sigma_\gamma$ lasketaan yhtälöstä:

$$\varepsilon \Sigma_\gamma = \frac{\varepsilon (\Sigma_{a,1} + \Sigma_{\text{rem}})}{\nu}. \quad (3.12)$$

Loviisan laskentajärjestelmässä liikkuvan fissioenergian osuutena on käytetty 7 %. Jokainen vektorin q komponentti kuvaa tehoa yhdessä laskentakopissa. Kyseisiä tehoarvoja käytetään koppien sisällä olevien polttoainesauvojen tehoarvoina, jolloin tehojakauma on siis rekonstruoitu sauvatasolle. Kun sauvatehojakauma normeerataan ykköseen, saadaan suhteellinen sauvatehojakauma. (Antila, 1999, 22–24)

ELSI-1440 päivittää jokaisen sauvan palaman laskemalla ensin aksiaalisuunnassa keskiarvoistetun tehojakauman. Tämän jälkeen sauvapalamajakaumaan lisättävä määrä lasketaan HEXBU-3D-ohjelman laskeman keskiarvoisen nippupalaman ja keskiarvoisen sauvapalaman erotuksena. Jos palaman lisäys on suurempi kuin 1 MWd/tU lisäystä kerrotaan suhteellisella sauvatehojakaumalla ennen sauvapalamajakauman päivitystä. (Kuusisto, 2007, 12)

Lopuksi mainitaan, että HEXBU- ja ELSI-ohjelmien välillä ei ole takaisinkytkentää: kun HEXBU-3D on ratkaissut neutronivuon nooditasolla, ELSI-1440:n ratkaisu ei enää vaikuta nooditason neutronivuohon.

3.3.3 Nipun sisäisen virtausjakauman määrittäminen

Reaktorista määritettävien termohydraulisten suureiden laskentaa varten on tunnettava alikanavakohtainen lähtöentalpiajakauma jokaiselle reaktorisydämen polttoainenipulle alikanavatasolla. Kyseinen jakauma lasketaan ELSI-1440-ohjelmassa niin kutsutulla jäädytteen sekoittumismallilla (Kuusisto, 2002b), jolla tuotetaan laskennallisesti riittävän nopeasti CFD-analyysiä (computational fluid dynamics) vastaava lähtöentalpiajakauma.

Lähtökohtana sekoittumismalli käyttää CFD-analyysin mukaista alikanavakohtaisesti keskiarvoistettua massavirrantiheysjakaumaa koko nipun pituudella. Todellisuudessa aksiaalisuuntainen massavirran tiheys ei ole vakio alikanavassa, sillä alikanavien välillä tapahtuu virtauksen turbulenttia sekoittumista. Virtauksen sekoittumisesta ja alikanaviin tehoa syöttävien polttoainesauvojen tehojen välisistä eroista seuraa kanavien välisten entalpiaerojen tasoittumista. Entalpien tasoittuminen otetaan huomioon sekoittumismallissa niin sanotun termisen diffuusiokertoimen avulla, joka kuvaa alikanavaparin välillä tapahtuvan poikittaisen massavirrantiheyden ja keskiarvoisen aksiaalisuuntaisen massavirranti-

heyden suhdetta. Termiset diffuusiokertoimet viritetään siten, että sekoittumismalli tuottaa mahdollisimman lähelle CFD-analyysin mukaisen lähtöentalpiajakauman. Sekoittumismallin mukaisen entalpiajakauman perusteella määritetään niin kutsuttu efektiivinen virtausjakauma, joka tuottaa sekoittumismallin mukaisen entalpiajakauman, kun oletetaan, että jokainen alikanava on eristetty. Efektiivisen virtausjakauman käyttö nopeuttaa termisten marginaalien laskentaa. (Kuusisto, 2002b, 2–4)

Käytännössä sekoittumismallissa ratkaistaan entalpia jokaisen ”alikanavanoodin” lähtöpisteessä sekä noodin puolella välissä. Jokainen alikanava jakautuu aksiaalisuunnassa kymmeneen alikanavanoodin. Alkanavanoodin korkeus on siis sama kuin HEXBU-3D:n laskeman kolmiulotteisen tehojakauman määrittäessä käytetyn nippunoodin korkeus. Tuloentalpia alkanavanoodille on sen alapuolella olevan noodin lähtöentalpia ja tuntemattomat entalpiat ratkaistaan energiataseista. Alkanavanoodin puolellavälissä entalpiainousu tuloentalpian suhteen saadaan olettamalla, että entalpiainousu johtuu pelkästään noodiin kontaktissa olevien polttoainesauvojen tehoista. Alkanavanoodin lähdössä entalpiainousun noodin puolivälin suhteen oletetaan myös aiheutuvan samalla tavalla polttoainesauvojen tehoista, mutta entalpia noodin puolella välissä korjataan huomioimaan alkanavien välisten virtausten sekoittuminen. (Kuusisto, 2002b, 2–4)

3.4 RESU-98

RESU-98 (Antila, 1999) on ohjelmisto, jonka avulla toteutetaan termisten marginaalien käytönaikainen valvonta Loviisan voimalaitoksen reaktoreille. Ohjelmisto määrittää kolmiulotteisen tehojakauman yhdistämällä tehojakauman teoreettisen ennusteen reaktorista saatuun mittausdataan. Saatua kolmiulotteista tehojakamaa käytetään sauvatason tehojakaumien sekä nippujen virtausjakaumien määrittämiseen. Kun teho- ja virtausjakaumat ovat tiedossa, termiset marginaalit sekä nippujen palamat voidaan laskea niiden perusteella. RESU-98 käyttää laskennassa Loviisan voimalaitoksen lataussuunnittelussa käytettyjä ohjelmistoja HEXBU-3D ja ELSI-1440. Termiset marginaalit lasketaan reaktorille pääsääntöisesti kerran tunnissa. Seuraavassa on kuvattu tehojakauman laskennan toteutus RESU-98:ssa.

3.4.1 Reaktorisydämen kolmiulotteisen tehojakauman laskenta

Reaktorisydämen kolmiulotteisen tehojakauman laskenta RESU-98-ohjelmalla perustuu vahvasti vuo -ja tehosovitteiden muodostamiseen yhdistämällä teoreettista ja mitattua dataa. Kolmiulotteinen teoreettinen tehojakauma lasketaan HEXBU-3D-ohjelmalla.

Reaktorista tehtävillä mittauksilla on tärkeä rooli kolmiulotteisen tehojakauman määrittämisen kannalta. Tärkeimmät reaktorisydäimestä mitattavat suureet ovat sydämen neutronivuo jakauma sekä nippukohtaiset jäähdytteen tulo- ja lähtölämpötilat. Neutronivuo ja jäähdytteen tulo- ja lähtölämpötilat sydämessä mitataan polttoainennippujen keskusputkessa sijaitsevien anturipeitsien avulla. Lämpötilatiedot kerätään 10 sekunnin ja neutronivuomittaukset 30 sekunnin välein ja RESU-98-laskennassa käytetään tunnin ajalta kerättyjen mittausten keskiarvoja (Antila, 1999, 7). Neutronivuon mittausta toteutetaan peitsen sisällä olevilla beetavirta-antureilla (SPND-anturi), joista jokainen sisältää neljä rodiumanturia 20 %, 40 %, 60 % ja 80 % sydämen korkeuksilla sekä yhden täyspitkän taustasignaalia mittaavan taustakaapelin (Pyykkö, 2023, 5). Neutronivuomittauksessa rodiumanturin 250 mm korkean emitteri-osan sisältämä rodium absorboi neutroneita, jolloin syntyvien tytärydinten hajotessa syntyy gamma- ja beetahiukkasia. Beetahiukkaset ja gammahiukkasten irrottamat elektronit kerääntyvät kollektorille ja syntyvä sähkövirta tulkitaan nopean neutronivuon arvoksi (Kuusisto, 2002a, 2).

Neutronivuoanturin taustakaapelia voidaan käyttää korjaamaan taustasäteilyn seurauksena syntyvä ”ylimääräinen” virta (neutronivuoanturi sijaitsee raskaasti gammasäteilevän reaktorisydämen sisällä, jolloin rodiumanturiin osuu väistämättä gammasäteilyä, joka on peräisin anturin ulkopuolelta). Jokaisen anturipeitsen kärjessä on K-tyypin termoelementti, jolla mitataan jäähdytteen tulolämpötilaa. Käytännössä jäähdytteen tulolämpötilana käytetään kuitenkin kiertopiirien kylmähaarojen keskiarvoa, koska reaktorin toimiessa teholla termoelementit eivät kykene mittaamaan jäähdytteen tulolämpötilaa luotettavasti (Antila, 1999, 8). Jäähdytteen lähtölämpötila mitataan K-tyypin termoelementeillä, jotka sijaitsevat suojaputkissa 200 mm polttoainennippujen aktiivisen osan yläpuolella (Pyykkö, 2023, 5). Alkuperäisessä 349 polttoainennipun sydämessä lähtölämpötilaa mitattiin 210 mittauslokaatiosta, mutta nykyään osa mittauslokaatioista on poistunut, koska ne sijait-

sevat esimerkiksi lisättyjen suojaelementtien paikalla. 313 polttoainenipun reaktorisydän sisältää 33 neutronivuoanturin sisältävää anturipeistä, jotka on sijoitettu kiinteiden nippujen keskusputkiin (Pyykkö, 2023, 4). Yhteensä reaktorissa on 132 rodiumanturia (4×33). Anturipeitset on sijoitettu reaktoriin siten, että 30 asteen symmetrisessä polttoainelatauksessa kaikkien polttoainenippujen aksiaalisuuntainen neutronivuo jakauma voidaan määrittää (Pyykkö, 2023, 6).

Tarkoituksena kolmiulotteisen tehojakauman määrittämisessä on yhdistää teoreettista dataa ja mittausdataa niin, että saadaan paras arvio todellisesta kolmiulotteisesta tehojakaumasta reaktorissa (Antila, 1999, 11). Mittausdatan ja teoreettisen datan yhdistäminen tapahtuu kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa määritetään neutronivuomittauksista m_{vuo} riippuva korjausfunktio h , jonka avulla HEXBU-3D-ohjelman määrittämä teoreettinen nopea neutronivuo jakauma ϕ_{ref} kohdistetaan mittausten osoittamaan suuntaan vuo jakaumaksi:

$$\phi_{\text{sovite}}(\vec{r}) = h(\vec{r}, m_{\text{vuo}})\phi_{\text{ref}}(\vec{r}, m_{\text{vuo}}). \quad (3.13)$$

Korjausfunktio h on lineaarikombinaatio jokaiselle anturitasolle k erikseen muodostetuista ”uusista” korjausfunktioista h_k , jotka ovat ennalta määritettyjen kantafunktioiden lineaarikombinaatioita. Korjausfunktio h_k sovitaan anturitasolle minimoimalla muotoa $r_k - h_k$ olevien jäännöspoikkeamien neliösumma, missä r_k on anturitasolta k mitatun ja HEXBU-3D:n laskeman teoreettisen neutronivuon suhde tietyssä anturitason mittauspisteessä. Optimitilanteessa neliösummassa on 33 termiä (yksi kutakin anturitason SPND-anturia kohti). Korjausfunktioiden h_k määrittämisen jälkeen koko reaktorisydäntä kuvaavan korjausfunktio h saadaan ehdoista, joilla aksiaalisuuntainen interpolointi on paras mahdollinen (esimerkiksi funktion h täytyy kulkea kaikkien h_k kautta aksiaalisuunnassa). (Antila, 1999, 14–17)

Tehojakauman määrittystä varten teho vaikutus alajakauma $\varepsilon \Sigma_f$ lasketaan HEXBU-3D-laskusta saatujen tehojakauman ja vuo jakauman suhteena. Ensimmäisen vaiheen arvio teho jakaumasta saadaan tällöin yhtälöstä:

$$P_{\text{ref}}(\vec{r}) = \varepsilon_{\Sigma_f}(\vec{r})\phi_{\text{sovite}}(\vec{r}), \quad (3.14)$$

missä ϕ_{sovite} , on yhtälöstä (3.13) saatu arvio reaktorisydämen vojojakaumasta. (Antila, 1999, 17)

Vuomittauksia hyödyntävän tehojakauman P_{ref} määrittämisen jälkeen siirrytään toiseen vaiheeseen lopullisen tehojakauman määrittämisessä. Toisessa vaiheessa tehojakauma P_{ref} sovitetaan lämpötilamittausten m_T perusteella laskettuihin kokonaisnipputehoihin. Mittauksiin perustuva nipputeho lasketaan nipun lähtö- ja tulolämpötiloja vastaavien entalpioiden erotuksen ja nipun nettovirtauksen tulona, jota on painotettu niin sanotulla termoparitulkintakertoimen käänteisluvulla (Kuopanportti, 2021, 1). Termoparitulkintakerroin on termoparin näkemän entalpianousun ja nettovirtauksen mukaisen keskimääräisen entalpianousun suhde, jolla otetaan huomioon nipun läpi kulkeneen nettovirtauksen ja nipun yläpään reikien kautta nippuun palanneen ohivirtauksen epätäydellinen sekoittuminen (Kuusisto, 2002b). Nipputehon mittausta käsitellään enemmän luvussa 5.4.2. Lämpötilamittaukset huomioiva tehojakauma saadaan yhtälöstä:

$$P_{\text{sovite}} = C(x, y, m_T)P_{\text{ref}}(\vec{r}), \quad (3.15)$$

missä C on korjausfunktio, joka suuntaa sovitetta lämpötilamittausten suuntaan analogisesti yhtälön (3.13) kanssa. Korjausfunktio C on luonteeltaan samankaltainen yhtälön (3.13) korjausfunktion h kanssa, sillä sen määrittämisessä minimoidaan funktionaali, jonka yhtenä terminä on jäännöspoikkeamien neliösumma. Kyseiset jäännöspoikkeamat ovat muotoa $s_n - m_n$, missä s_n on määritettävä kerroin korjausfunktioille ja m_n mitatun nipputehon ja yhtälöstä (3.14) saadun nipputehon suhde nipulle n . (Antila, 1999, 18)

Lopuksi tehojakauma normeerataan reaktorin termiseen tehoon, joka lasketaan sekundääripuolen mittausten tuntikeskiarvoina (Antila, 1999, 22). Lisäksi normeeraus voidaan tarpeen vaatiessa suorittaa joko vuomittauksiin sovitetulla tehojakaumalla (3.14) tai lämpötilamittauksiin sovitetulla tehojakaumalla (3.15) käyttämällä tiedossa olevia normeerauskertoimia (Antila, 1999, 22). Kyseiset kertoimet päivitetään suoritusarvolaskennan aikana vertaamalla vuo- ja lämpötilamittauksiin sovitettuja tehojakaumia mitattuun termiseen

tehoon (Kuopanportti, 2020b, 3).

3.4.2 Sauvatason tehojakauma reaktorin online-valvonnassa

Nippujen sisäiset tehojakaumat on kyettävä luomaan riittävän nopeasti kaikille reaktorisydämessä sijaitseville polttoainenipuille reaktorin online-valvontaa varten. Nippujen sisäisten tehojakaumien laskentaa nopeutetaan RESU-98:ssa seuraavasti. ELSI-1440 laskee nipun sisäinen tehojakauman K reaktorin nimellisessä tilassa. Kyseinen sisäinen tehojakauma K esitetään niin sanottujen makroskooppisen K_{makro} ja mikroskooppisen osan K_{mikro} tulona:

$$K(x, y) = K_{\text{makro}}(x, y)K_{\text{mikro}}(x, y). \quad (3.16)$$

Mikroskooppinen osa ottaa huomioon polttoaineen palaman funktiona hitaasti muuttuvat nipun sisäiseen tehojakaumaan vaikuttavat tekijät kuten sauvojen palaman ja nipun profiloinnin vaikutuksen. Reaktorissa vallitseva tila (esimerkiksi muutos säätösauvojen asennossa) huomioidaan makroskooppisen osan avulla. Makroskooppinen osa lasketaan nipulle ELSI-1440:n käyttämän nopean vuon interpoloinnin erityistapauksena yhtälöstä:

$$K_{\text{makro}}(x, y) = L\varphi, \quad (3.17)$$

missä L on nipulle spesifinen 126×7 vakiomatriisi, joka on laskettu valmiiksi nimellisessä tilassa tehdyn ELSI-1440-laskun yhteydessä ja φ on 7×1 vektori, joka riippuu ainoastaan HEXBU-3D-laskun mukaisesta nipun ja sen naapureiden nooditason nopeista vuoarvoista. Matriisin L rivien lukumäärä vastaa nipussa olevien polttoainesauvojen lukumäärää (126) ja vektorin φ komponenttien lukumäärä vastaa noodin ja sen naapurinoodien lukumäärää. Mikroskooppinen osa lasketaan nimellisessä tilassa jakamalla ELSI-1440-laskun nipun sisäinen tehojakauma makroskooppisella osalla jokaisella aksiaalisuuntaisella nooditasolla ja laskemalla tulosten keskiarvo. Nipun sisäisen tehojakauman mikroskooppinen osa on siis keskiarvo noodikohtaisista mikroskooppisista tehojakaumista eli se kuvaa aksiaalisuuntaista keskiarvoa (makroskooppinen osa ei ole keskiarvo, vaan se kuvaa nipun

sisäistä tehojakaumaa tietyllä nooditasolla). Kun mikroskooppinen osa on laskettu, se tallennetaan tietokantaan. Samalla päivitetään luvussa 3.3.3 mainittu nipun efektiivinen virtausjakauma. Tällä järjestelyllä nipun sisäisten tehojakaumien määrittäminen onnistuu laskennallisesti nopeasti, sillä se vaatii periaatteessa ainoastaan nooditason HEXBU-3D-laskun tekemistä. Historiallisista syistä päivitysvauhti nippujen sisäisen tehojakauman mikroskooppiselle osalle on yksi nippu per tunti, joten koko reaktori saadaan käytyä läpi vajaassa kahdessa viikossa. (Antila, 1999, 24–25)

3.4.3 Termohydraulisten suureiden ja palaman laskenta

RESU-98 valvoo, että seurattavien termohydraulisten suureiden: lineaaritehon, alikanavan entalpiainousun ja lähtölämpötilan sekä DNB-suhteen (pienin kriittisen lämpövuon suhde paikalliseen lämpövuohon) turvallisuusrajat eivät rikkoudu reaktorin käytön aikana (Vehmaanperä, 2020, 10). Lisäksi RESU-98 laskee reaktorin kolmiulotteisen palamajakauman ja sen perusteella määrittelee polttoaineen isotooppimäärät koppelipalamaohjelmalla laadittujen taulukoiden avulla, joissa isotooppimäärät on esitetty palaman funktiona kullekin polttoainetyypille (Vehmaanperä, 2020, 26).

Reaktorivalvonnassa termohydraulisten suureiden eroa turvallisuusrajoihin valvotaan termisten marginaalien avulla, jotka kertovat kuinka monta prosenttia turvallisuusrajan arvosta on poistettava, jotta saadaan laskettu rajoittavin arvo. Lataussuunnittelussa sitä vastoin käytetään lähinnä termisiä nousuvaroja, jotka kertovat kuinka monta prosenttia laskettuun rajoittavaan arvoon on lisättävä, jotta saadaan turvallisuusrajan arvo. Terminen nousuvara saadaan kertomalla vastaavaa termistä marginaalia raja-arvon ja rajoittavan arvon suhteella.

Jokaisen nipun maksimilineaariteho lasketaan sisäisen tehojakauman perusteella ottamalla huomioon varmuuskerroin, joka voidaan määrittellä polttoainetyypikohtaisesti. Nipun lineaaritehovara määräytyy pienimmästä sauvakohtaisesta lineaaritehovarasta (Antila, 1999, 27). Tuoreelle nipulle suurin sallittu lineaariteho on 325 W/cm ja raja pienenee fissiokaasujen vapautumisen rajoittamiseksi palaman kasvaessa (Vehmaanperä, 2020, 6). Lineaaritehon raja perustuu polttoaineen käyttäytymiskokeisiin LOCA-tilanteessa (loss-

of-coolant accident). Pienin DNB-vara lasketaan alikanavatasolla käyttämällä kyseiselle polttoainetyypille soveltuvaa korrelaatiota, jonka avulla määritetään kriittinen lämpövuoto. Korrelaation mukainen kriittinen lämpövuoto riippuu vahvasti höyryn massaosuudesta, joka taas riippuu jäähdytteen entalpiasta alikanavassa (Kuopanportti, 2020a, 6). Alikanavan kuumin lähtölämpötila lasketaan muuntamalla suurin alikanavakohtainen lähtöentalpia lämpötilaksi (Antila, 1999, 28). Suurin sallittu alikanavasta poistuvan jäähdytteen lähtölämpötila on 325 °C, millä toteutetaan vaatimus, jonka mukaan jäähdytteen kokonaiskiehuminen on vältettävä kuumimmassakin alikanavassa (Kuopanportti, 2020a, 5). Muunto entalpien ja lämpötilan välillä tehdään ennalta määrättyjen polynomisovitteiden avulla (Kuopanportti, 2022a, 3). Suurin alikanavakohtainen lähtöentalpia taas saadaan käyttämällä luvussa 3.3.3 mainittua efektiivistä virtausjakaumaa ja eristetyn alikanavan olettamusta. Efektiivinen virtausjakauma päivitetään luvussa 3.4.2 mainitun mikroskooppisen tehojakauman päivityksen yhteydessä (Antila, 1999, 26). Polttoaineen palamajakautuma lasketaan tehojakauman aikaintegraalin ja polttoaineen uranimassan tiheyden avulla (Antila, 1999, 29). Lasketun palamajakautuman tarkkuus on lähtökohtaisesti sama kuin lasketun nipputehon tarkkuus, jonka kaksi sigma -virhe on arvion mukaan noin 4 % (Vehmaanperä, 2020, 31). Virhe kuitenkin pienenee sydämen kokonaispalaman kasvaessa, sillä virheet lasketussa palamajakautumassa kompensoivat toisiaan: jos jossain nipussa palama on liian suuri, se on jossain nipussa liian pieni. Esimerkiksi reaktorista vaihtolatauksen yhteydessä poistettavien nippujen keskipalaman tarkkuus on samaa luokkaa kuin tuotetun termisen energian tarkkuus, joka on noin 1 % (Vehmaanperä, 2020, 31).

Lineaaritehon, entalpianousun sekä DNB-suhteen laskentaan sisältyy epävarmuutta, joka otetaan huomioon polttoainetyyppikohtaisten varmuuskertoimien avulla. Varmuuskertoimet määritetään siten, että laskettu suure ei 95 % todennäköisyydellä ylitä sille määritettyä turvallisuusrajaa. Varmuuskertoimilla on tarkoitus saada aikaan tilanne, jossa on 95 % varmuus, että lämmönsiirtokriisi polttoainesauvan pinnalla sekä polttoainepellettien liiallinen sulamiseen johtava lämpötila on vältetty (Kuopanportti, 2020a, 3).

Viimeisenä on syytä huomioda, että lataussuunnittelussa RESU-98-ohjelmaa ei käytetä, vaan suunnittelu toteutetaan pelkästään HEXBU-ELSI-ohjelmilla (Kuopanportti, 2022c, 4). Kuitenkin kaikki tässä luvussa esitetty pätee myös lataussuunnittelussa laskettuihin termohydraulisiin suureisiin.

4 Koppipalamaohjelman tuottaman datan jälkikäsitteily

Tässä luvussa kuvataan CASMO-ohjelman laskentatuloksiin tehdyn jälkikäsitteilyn seurauksena syntyvät parametrit, jotka nodaalikoodi HEXBU-3D ja sauvatehojen rekonstruktio-ohjelma ELSI-1440 tarvitsevat toimiakseen (CASMO-ohjelmalla tarkoitetaan sekä CASMO5- että CASMO-4E-ohjelmia). Tarvittavia parametreja kutsutaan tässä työssä Loviisan voimalaitoksen laskentajärjestelmässä käytetyllä nimellä ”MOD5”-vakiot⁵. MOD5-vakioiden ja jälkikäsitteilyjärjestelmän kuvaamisen jälkeen selvitetään muutokset, jotka järjestelmän jälkikäsitteilyohjelmiin on täytynyt tehdä, jotta se toimii myös CASMO5-ohjelmalla.

On syytä korostaa, että pienetkin muutokset laskentajärjestelmässä käytettyihin jälkikäsitteilyohjelmiin voivat johtaa suurien virheiden syntymiseen esimerkiksi laskettuihin termohydraulisiin suureisiin sydäntason laskennassa. Toisaalta myös tarpeellisten muutoksien tekemättä jättäminen voivat samalla tavalla johtaa suuriin virheisiin. Tämän takia jälkikäsitteilyohjelmiin tehdyt muutokset tai muutoksien tekemättä jättäminen on oltava hyvin perusteltuja. Muutoksien tarpeen selvittämiseksi on pystyttävä jäljittämään, kuinka CASMO-laskennasta lähtöisin oleva data on päätynyt jälkikäsitteilyohjelmien kautta la-taussuunnittelussa käytettävien HEXBU-ELSI-ohjelmien syötetiedostoihin.

4.1 Nodaali- ja sauvatehorekonstruktio-ohjelman tarvitsemien parametrien kuvaus

Nodaali-ohjelma HEXBU-3D ja sauvatehojen rekonstruktio-ohjelma ELSI-1440 tarvitsevat MOD5-vakiot diffuusioparametrien, sovitekertoimien sekä xenon- ja samariumparametrien muodossa. Ensimmäisenä mainittuja käytetään kaksiryhmädiffuusioyhtälöiden (3.5) ja (3.7) ratkaisemiseen ja toisena mainittuja takaisinkytkentöjen huomioimiseen. Xenon- ja samariumparametreja tarvitaan HEXBU-3D:ssä termisen ryhmän absorptio-vaikutusalojen korjaamiseen eri tehotilanteisiin.

⁵Tarkkaan ottaen parametrien nimi muodostuu ”MOD”-osasta ja osan perään lisätystä jälkiliitteestä, joka kuvaa HEXBU-3D:n versionumeroa, jolle parametrit on tehty, esimerkiksi ”MOD5.3.0”. Tällöin parametrit on tehty HEXBU-3D:n versiolle MOD5.3.0.

MOD5-vakiot lasketaan Loviisan voimalaitoksen laskentajärjestelmässä kahdessa tilanteessa. Yksi tilanne vastaa tehotilaa, jossa reaktori toimii nimellisellä 1500 MW lämpötehoilla ja toinen tilanne nollatehotilaa. Nollatehotilalaskenta tehdään isothermisissä lämpötiloissa 20, 100, 150, 200 ja 260 °C. Tehotilassa laskettuja MOD5-vakioita käytetään esimerkiksi ennustetun kriittisen boorikonsentraation, palamajakaumien, reaktiivisuuskertoimien ja luvussa 3.4.3 kuvattujen termohydraulisten suureiden nousuvarojen laskennassa sekä reaktorivalvonnassa että lataussuunnittelussa. Nollatehotilassa laskettuja MOD5-vakioita käytetään lataussuunnittelussa jakson alun kriittisten booripitoisuuksien, sammutusmarginaalien ja isothermisen reaktiivisuuskertoimen laskennassa. MOD5-vakioiden avulla laskettuja reaktorifysikaalisia ominaisuuksia on kuvattu tarkemmin luvussa 6.3.

CASMO-ohjelman teho- ja nollatehotiloissa tapahtuvan laskennan aikana tehdään lisäksi tietyissä palamapisteissä kerroinlaskut (engl. branching calculation), joissa varioidaan tilamuuttujia, jotka liittyvät erilaisiin huomioituihin takaisinkytkentöihin. Varioitavat tilamuuttujat ovat polttoainepelletin lämpötila, jäähdytteen tiheyden ja lämpötilan yhtäaikainen muutos sekä booritiheyden muutos. Kerroinlaskenta tehdään tehotilan palamalaskun aikana yhdeksässä eri tapauksessa, jotka on listattu taulukossa 2. Jäähdytteen lämpötilan muuttuessa tiheyden muutos on päinvastaisen suuntaan. Kaikki tehotilojen kerroinlaskut tehdään myös nollatehotiloissa käyttämällä ”uudelleenkäynnistystiedostoa” (engl. restart file) eli res-tiedostoa, joka tallennetaan tehotilan palamalaskun nimellistapauksen aikana. Nollatehotilojen kerroinlaskut eroavat tehotilan kerroinlaskuista siten, että niissä lämpötilamuutos tapahtuu isothermisesti, jolloin siis kaikkien komponenttien lämpötila muuttuu kuten jäähdytteen lämpötila. Tehotilan kerroinlaskuissa esimerkiksi moderaattorin lämpötila säilyy nimellisarvossa, kun jäähdytteen lämpötila muuttuu. Tämä johtuu siitä, että nippujen välissä virtaavan veden lämpötilan oletetaan säilyvän vakioarvossa tilamuutosten aikana. Nollatehotilojen isothermisellä lämpötilalla 20 °C taulukon 2 tapauksia 5 ja 9 ei lasketa. Tapausnumerointi noudattaa numerointia, jota käytetään laskentajärjestelmän skripteissä ja ”puuttuvat” tapaukset 6, 7 ja 8 on jätetty pois, sillä niitä ei lasketa ja ne eivät näin ollen ole oleellisia MOD5-vakioiden laskentajärjestelmässä.

Taulukko 2. MOD5-vakioiden luomisen yhteydessä tehtävät CASMO-kerroinlaskut teho- ja nollatehutiloissa.

Tapaus	Polttoainepelletin lämpötila	Jäähdytteen lämpötila	Jäähdytteen tiheys	Boorikonsentraatio
0	nimellinen	nimellinen	nimellinen	nimellinen
1	vähennetty	nimellinen	nimellinen	nimellinen
2	kasvatettu	nimellinen	nimellinen	nimellinen
3	nimellinen	nimellinen	nimellinen	nolla
4	nimellinen	kasvatettu	vähennetty	nolla
5	nimellinen	vähennetty	kasvatettu	nolla
9	nimellinen	vähennetty	kasvatettu	kasvatettu
10	nimellinen	kasvatettu	vähennetty	kasvatettu
11	nimellinen	nimellinen	nimellinen	kasvatettu

Tarvittavia diffuusioparametreja on yhdelle polttoainepun palamapisteelle 21, jos ohjelma on HEXBU-3D ja yhdelle polttoainesauvan palamapisteelle 11, jos ohjelma on ELSI-1440. Diffuusioparametreja merkitään tässä symboleilla d_1-d_{21} ja niiden merkitys on kuvattu taulukossa 3. Taulukon fissiotuottovaikutusala on fissiovaikutusala kerrottuna keskimääräisesti fissiossa syntyvällä neutronimäärällä ja poistovaikutusalan tulo nopean ryhmän neutronivuon kanssa kertoo nettonopeuden, jolla neutronit hidastuvat nopeasta ryhmästä termiseen ryhmään (ylössironta on siis huomioitu poistovaikutusalassa). Jos ohjelma on ELSI-1440, epäjatkuuustekijöitä ja kineettisiä parametreja ei käytetä, jolloin parametrit $d_{12} - d_{21}$ eivät siis ole käytössä.

Taulukko 3. MOD5-vakiot diffuusioparametrien muodossa. R_1 tarkoittaa nopeaa ja R_2 termistä energiaryhmää. Viivästyneiden neutronien osuudet ovat efektiivisiä, käänteisnopeudet vuo- ja adjointvuo painotettuja ja vaikutusalat makroskooppisia.

d_1	Nipun palama	d_{12}	R_1 radiaalinen epäjatkuuustekijä
d_2	R_1 diffuusiovakio	d_{13}	R_2 radiaalinen epäjatkuuustekijä
d_3	R_1 absorptiovaikutusala	d_{14}	R_1 käänteisnopeus
d_4	R_1 fissiotuottovaikutusala	d_{15}	R_2 käänteisnopeus
d_5	R_1 fissiovaikutusala	Viivästyneiden neutronien osuudet	
d_6	Poistovaikutusala	d_{16}	Ryhmä 1
d_7	R_2 diffuusiovakio	d_{17}	Ryhmä 2
d_8	R_2 absorptiovaikutusala	d_{18}	Ryhmä 3
d_9	R_2 fissiotuottovaikutusala	d_{19}	Ryhmä 4
d_{10}	R_2 fissiovaikutusala	d_{20}	Ryhmä 5
d_{11}	Energia per fissio	d_{21}	Ryhmä 6

Takaisinkytkentöjen mallintamista varten HEXBU-3D-ohjelmassa huomioidaan seuraavien tilamuuttujien muutokset: polttoainepelletin lämpötilan muutos (Dopplerin vaikutus), jäähdytteen tiheyden ja lämpötilan samanaikainen muutos sekä boorin tiheyden eli jäähdytetiheyden ja boorikonsentraation tulon muutos. ELSI-1440-ohjelmassa huomioidaan ainoastaan muutos boorin tiheydessä. Tilamuuttujien muutoksista aiheutuvat takaisinkytkennät mallinnetaan korjaamalla vaikutusaloja ja diffuusiovakioita kuten:

$$\Sigma(X + \Delta X) = \Sigma(X) + \Delta\Sigma(\Delta X), \quad (4.1)$$

missä Σ kuvaa taulukon 3 vaikutusaloja ja diffuusiovakioita, X on tilamuuttuja ja $\Delta\Sigma$ tilamuuttujan muutoksesta ΔX riippuva takaisinkytkennän huomioiva korjaus vaikutusalaan tai diffuusiovakioon. Polttoainepelletin lämpötilan muutoksessa tilamuuttujana käytetään polttoainepelletin lämpötilan neliöjuurta. Jäähdytteen tiheyden muutoksessa diffuusiovakioiden sijasta korjaus tehdään diffuusiovakioiden käänteisluvuille eli käytännössä transportvaikutusaloihin (Kaloinen, 2006, 6). Ryhmävaikutusalojen ja -diffuusiovakioiden korjaukset lasketaan polynomisovitteilla, jotka ovat muotoa:

$$\Delta\Sigma(\Delta X) = c_1\Delta X + c_2(\Delta X)^2 + c_{11}\rho_B\Delta\rho_{\text{coo}}, \quad (4.2)$$

missä c_1 , c_2 ja c_{11} ovat takaisinkytkentöjen huomioimiseen tarvittavat MOD5-vakiot sovitekertoimien muodossa (Rantamäki ja Anttila, 2008, 12). Yhtälön (4.2) oikean puolen kolmas termi on korjaus, jolla otetaan huomioon booritiheyden ja jäähdytetiheyden samanaikainen muutos (Rintala, 2016, 26). Korjausermissä ρ_B on booritiheys laskentatilassa ja $\Delta\rho_{\text{coo}}$ jäähdytteen tiheyden muutos siirryttäessä nimellisestä tilasta laskentatilaan. Kerroin c_{11} poikkeaa nolasta ainoastaan booritiheyden muutoksessa HEXBU-3D-ohjelmassa, missä sitä ei myöskään käytetä diffuusiovakioiden korjauksessa. Kerrointa c_{11} ei lasketa diffuusiovakioille, koska sovitekertoimen laskevan ohjelman (ks. luku 4.2) käyttämä menetelmä ei ole luotettava diffuusiovakioille, joille ohjelma käyttää eri menetelmää kuin ryhmävaikutusaloille (Kaloinen, 2006, 8).

HEXBU-3D olettaa, että sen laskennassa käyttämät termisen ryhmän absorptiovaikutusalat on laskettu tilanteessa, jossa xenon- ja samariumkonsentraatiot ovat tasapainossa. Tällöin siis jokaisella hetkellä ksenonin ja samariumin tuottonopeuksien oletetaan olevan yhtä suuria kuin niiden hajoamisnopeuksien. Jos tehotiheys poikkeaa nimellisen tilan tehotiheydestä, jolla taulukon 3 mukainen termisen ryhmän absorptiovaikutusala on laskettu, absorptiovaikutusala ei enää kuvaa ksenonin ja samariumin tasapainotilannetta. HEXBU-3D tekee nimellisen tilan termisen ryhmän absorptiovaikutusalaan korjauksen, joilla se saadaan vastaamaan uuden tehotason ksenonin ja samariumin tasapainotilaa. HEXBU-3D:n käyttämä korjausmalli vaatii nimellistilatietoa tasapainoksenonin, -jodin ja -samariumin fissiotuottokerroimista (engl. effective fission yield) sekä niin sanotuista ksenon- ja samariumvuovarvoista (Kaloinen, 1992, 6–9). Esimerkiksi tasapainoksenonin fissiotuottokerroin on tuottokerroin, jolla Xe-135 tuotetaan fissioissa niin, että sen atomitiheys säilyy vakiona (Hykes et al., 2022b, 770). Ksenon- ja samariumvuo voidaan ajatella neutronivoina, joilla neutronien absorpti nopeus ksenoniin ja samariumiin ovat samat kuin ksenonin ja samariumin radioaktiivinen hajoamisnopeus.

Edellä kuvattuja MOD5-vakioita ovat siis taulukon 3 diffuusioparametrit, yhtälön 4.2 sovitekertoimet ja nimellistilassa lasketut ksenonin ja samariumin efektiiviset fissiotuotot sekä ksenon- ja samariumvuot. Lisäksi cax-tiedostosta poimittavia MOD5-vakioita

ovat ohivirtausosuus, jäähtytteen tiheys, boorikonsentraatio, polttoainepelletin ja mode-
raattorin lämpötilat, tehotiheys ja keskimääräinen väkevöintiaste nollapalamalla. Loput
HEXB-3D- ja ELSI-1440-ohjelmien syöteparametreista (ts. ohjelmien toimintaa ohjaa-
viin kortteihin asetettavista lukuarvoista) eivät riipu CASMO-ohjelman toiminnasta ja
sen luomasta cax-tiedostosta. Seuraavaksi kuvataan, kuinka CASMO-ohjelmista riippu-
vat MOD5-vakiot saadaan luotua jälkikäsitteilyohjelmien avulla.

4.2 Jälkikäsitteilyohjelmistojen kuvaus

MOD5-vakioiden laskentajärjestelmä koostuu CASMO-ohjelmasta, MOD5-vakiot oike-
aan formaattiin tekevistä Fortran-kielisistä jälkikäsitteilyohjelmista CAXMAN (Anttila,
1998) ja CRFIT (Kaloinen, 2006) sekä järjestelmän ohjaamiseen tarvittavista Python-
ja Perl-kielisistä apuohjelmista. Apuohjelmilla tehdään tarvittavat syötetiedostot, siirrel-
lään ja uudelleennimetään syntyviä tiedostoja ja kutsutaan järjestelmän kannalta oleel-
lisimpia CASMO-, CAXMAN- ja CRFIT-ohjelmia. CAXMAN-ohjelma on suunniteltu
lukemaan CASMO-4E-ohjelman luomaa cax-tiedostoa, josta se kerää oleelliset MOD5-
vakioiden luomiseen tarvittavat tiedot ja luo syötetiedoston CRFIT-ohjelmalle. CRFIT-
ohjelma laskee sille annetun syötetiedoston perusteella takaisinkytkentöjen kuvaamiseen
vaadittavat sovitekertoimet sekä luo tiedostot, jotka sisältävät MOD5-vakiot oikeanlaises-
sa lukuformaattissa HEXB-3D:lle ja ELSI-1440:lle. CRFIT-ohjelmaan ei tarvinnut tehdä
muutoksia, jotta laskentajärjestelmä saatiin toimimaan CASMO5-ohjelmalla. Kaikki tar-
vittavat muutokset tehtiin CAXMAN-ohjelmaan ja apuohjelmiin. Tämä on odotettavissa,
sillä CAXMAN-ohjelman tarkoitus on luoda syötetiedosto CRFIT-ohjelmalle. CRFIT-
ohjelman toiminta ei siis riipu CASMO-ohjelman toiminnasta.

Tämän työn kannalta laskentajärjestelmän apuohjelmien toiminnan yksityiskohtainen ku-
vaus ei yhtä poikkeusta lukuun ottamatta ole oleellista, sillä järjestelmän suorituslogiik-
ka on säilynyt käytännössä muuttumattomana siirryttäessä CASMO-4E-ohjelmasta CAS-
MO5-ohjelmaan, eivätkä apuohjelmat sinällään vaikuta MOD5-vakioihin. Apuohjelmien
toimintaa on kuvattu tarkemmin viitteessä (Rantamäki ja Anttila, 2008). Mainittu poik-
keus liittyy CASMO5- ja CASMO-4E-ohjelmien res-tiedostoihin ja sitä käsitellään lu-
vussa 4.4

MOD5-vakioiden laskenta alkaa CASMO-ohjelmien koppipalamalaskennalla, joilla tuotetaan lähtödataa jälkikäsitteilyä varten CAXMAN-ohjelmalle, joka luo syötetiedoston CRFIT-ohjelmalle. Ensin koppipalamalasku tehdään taulukon 1 mukaisessa nimellisessä täyden tehon tilassa jokaiselle halutulle polttoaineelle. Laskennassa käytetty kokonaispalama nimellisessä tilassa on 60 MWd/kgU ja palama-askeleen pituus 0,5 MWd/kgU. Palamapisteiden tilat tallennetaan 12 palamapisteessä res-tiedostoon, jota käyttämällä CASMO-laskenta voidaan aloittaa uudelleen nollatehotiloissa. Nollatehotilojen palamalasku tehdään ainoastaan käymällä läpi tehotiloissa res-tiedostoon tallennetut palamapisteet. Tällöin nollatehotiloissa jokaisessa palamapisteessä polttoaineen materiaalien nuklidihistoriat ovat peräisin nimellisestä täyden tehon tilanteesta. Poikkeuksen muodostaa Xe-135:n atomitiheys, joka pakotetaan nollassi nollatehotilojen palamapisteissä CASMO-ohjelman syötetiedoston XEN-kortilla (tehotilanteessa Xe-135 pakotetaan samalla kortilla aina tasapainoon). Näin tehdään, koska nollatehotiloissa Xe-135-pitoisuus oletetaan nollassi. Nimellisestä tilasta ja nollatehotiloista saatavaa CASMO:n laskemaa dataa käytetään luvussa 4.1 kuvattujen diffuusioparametrien sekä ksenon- ja samariumparametrien luomiseen. Yhtälön (4.2) sovitekertoimien laskentaa varten tehdään lisäksi kerroinlaskenta sekä teho- että nollatehotilassa varioimalla takaisinkytkentöihin liittyviä tilamuuttujia taulukossa 2 esitetyllä tavalla.

Diffuusioparametrit annetaan HEXBU-3D- ja ELSI-1440-ohjelmille niin sanotuilla DIFCON-korteilla, joiden formaatti ohjelmien syötetiedostoissa on esitetty taulukossa 4. Parametrit d_1 – d_{21} on määritelty taulukossa 3. Jos käytetty ohjelma on ELSI-1440, parametrit d_{12} – d_{21} puuttuvat kortista, mutta sen formaatti on muuten samannäköinen. Lisäksi reaktorivalvonnassa käytetylle ohjelmalle RESU-98 joudutaan antamaan syötetiedosto, jonka HEXBU-3D:lle tarkoitettuista DIFCON-korteista puuttuvat epäjatkuuustekijät eli parametrit d_{12} ja d_{13} . Tämä joudutaan tekemään, koska RESU-98:n käyttämässä ELSI-1440-ohjelman syötetiedostossa pitää olla kopio HEXBU-3D:n diffuusioparametrit sisältävästä syötetiedostosta ilman epäjatkuuustekijöitä. RESU-98-ohjelman sisällä toimiva HEXBU-3D-versio kuitenkin käyttää epäjatkuuustekijöitä (Kuopanportti, 2022b, 6).

Taulukko 4. Diffuusioparametreja vastaavat MOD5-vakiot HEXBU-3D:n syötetiedostossa.

/DIFCON/	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆
	d ₇	d ₈	d ₉	d ₁₀	d ₁₁	
	d ₁₂	d ₁₃				
	d ₁₄	d ₁₅				
	d ₁₆	d ₁₇	d ₁₈	d ₁₉	d ₂₀	d ₂₁

CAXMAN-ohjelma lukee CASMO-ohjelman luomaa cax-tiedostoa ja poimii taulukon 4 parametrit cax-tiedoston eri lohkoista. Lohkojen nimet muodostuvat kolmen kirjaimen yhdistelmänä ja niihin tullaan viittamaan runsaasti tässä ja seuraavissa luvuissa. Kaikki tarvittavat cax-tiedoston lohkot on kuvattu lyhyesti taulukossa 5.

Taulukko 5. Cax-tiedostosta luettavien lohkojen sisältöjen kuvaukset, jotka on referoitu CASMO5-ohjelman manuaalista (Hykes et al., 2022b). TTL-lohko on käytössä CASMO5-ohjelmassa ja TIT-lohko CASMO-4E-ohjelmassa.

ACS	Aluekeskiarvoistetut makroskooppiset ryhmävaikutusalat
ADF	Epäjatkuvuustekijät
AFL	Alueintegroidut ja aluekeskiarvoistetut neutronivuot
DEL	Neutronien kinetiikkadata
EXP	Nipun sauvapalamajakauma
HYD	Hydrauliikka- ja geometriadata
MIS	Sekalainen data ml. tasapainotilan fissiotuotot Xe-135:lle ja Sm-149:lle
POL	Kaksiryhmädata 3D-nodaaliohjelmille
SIM	Dataa SIMULATE-ohjelmalle ml. U-235-väkevointiaste nipussa
TTL / TIT	Tilapisteparametrit ml. lämpötilat ja palama

Taulukossa 6 on esitetty diffuusioparametrit sekä cax-tiedoston lohkojen nimet, joista parametrit poimitaan HEXBU-3D-ohjelmalle. Taulukossa 7 on esitetty vastaavat tiedot ELSI-1440-ohjelmalle. Nipun palamaa lukuun ottamatta kaikki HEXBU-3D:n vaatimat taulukon 6 parametrit poimitaan HEXBU-3D:n syötetiedostoon sellaisenaan, eikä CAX-

MAN tee niihin muokkauksia. Palamaa CAXMAN kertoo tuhannella, sillä HEXBU- ja ELSI-ohjelmissa palaman yksikkö on MWd/tU ja CASMO-ohjelmissa MWd/kgU. Samasta syystä CAXMAN kertoo myös ELSI-1440-ohjelmaa varten poimittavia sauvata-son palamia tuhannella. On huomioitava, että jos dataa poimitaan ELSI-mallin alueel-le, joka ei sisällä polttoainetta, sen ”palama” poimitaan nippupalamana TTL-lohkosta. Lisäksi ELSI-1440:n fissiossa vapautuva energia poimitaan samasta POL-lohkosta kuin HEXBU-3D:lle. Fissiossa vapautuvaa energiaa ja sauvapalamaa lukuun ottamatta ELSI-1440:lle taulukon parametreja 7 ei poimita suoraan, vaan käytetty menetelmä on hieman monimutkaisempi, mikä johtuu ELSI-1440- ja CASMO-ohjelmien erilaisista makroaluei-den tilavuuksista. ELSI-diffuusioparametrien CAXMAN-muokkausta käsitellään luvussa 4.4.

Taulukko 6. Diffuusioparametrien lähteet cax-tiedostosta HEXBU-3D:lle. R₁ tarkoittaa nopeaa ja R₂ termistä energiaryhmää. Energia per fissio sisältää kaappausgammojen energian.

Diffuusioparametri	Cax-tiedoston lohko	Diffuusioparametri	Cax-tiedoston lohko
Nippupalama	TTL	R ₁ epäjatkuuustekijä	ADF
R ₁ diffuusiovakio	POL	R ₂ epäjatkuuustekijä	ADF
R ₁ absorptiovaikutusala	POL	R ₁ käänteisnopeus	DEL
R ₁ fissiotuottovaikutusala	POL	R ₂ käänteisnopeus	DEL
R ₁ fissiovaikutusala	POL	Viivästyneiden neutronien osuudet	
Poistovaikutusala	POL	Ryhmä 1	DEL
R ₂ diffuusiovakio	POL	Ryhmä 2	DEL
R ₂ absorptiovaikutusala	POL	Ryhmä 3	DEL
R ₂ fissiotuottovaikutusala	POL	Ryhmä 4	DEL
R ₂ fissiovaikutusala	POL	Ryhmä 5	DEL
Energia per fissio	POL	Ryhmä 6	DEL

Taulukko 7. Diffuusioparametrien lähteet cax-tiedostosta ELSI-1440:lle. R_1 tarkoittaa nopeaa ja R_2 termistä energiaryhmää. Energia per fissio sisältää kaappausgammojen energian.

Diffuusioparametri	Cax-tiedoston lohko
Sauvapalama	EXP, TTL
R_1 diffuusiovakio	ACS, AFL
R_1 absorptiovaikutusala	ACS, AFL
R_1 fissiotuottovaikutusala	ACS, AFL
R_1 fissiovaikutusala	ACS, AFL
Poistovaikutusala	ACS, AFL
R_2 diffuusiovakio	ACS, AFL
R_2 absorptiovaikutusala	ACS, AFL
R_2 fissiotuottovaikutusala	ACS, AFL
R_2 fissiovaikutusala	ACS, AFL
Energia per fissio	POL

Takaisinkytkentöjen huomioimista varten tarvittavat sovitekertoimet annetaan HEXBU- ja ELSI-ohjelmien syötetiedostoissa niin sanotuilla DOPLER-, BORON-, ja MODER-korteilla, jotka tarvitaan vastaavassa järjestyksessä Dopplerin vaikutuksesta, booritiheyden muutoksesta sekä jäähdytteen tiheyden ja lämpötilan yhtäaikaismuutoksesta aiheutuvia takaisinkytkentöjä varten. Esimerkiksi DOPLER-kortin formaatti on esitetty taulukossa 8, jossa d_1 on nippupalama ja c_1^i sekä c_2^i taulukon 3 diffuusioparametrin d_i Dopplerin vaikutuksen huomioimiseen tarvittavat sovitekertoimet. BORON- ja MODER-korttien formaatti on samanlainen, mutta BORON-kortissa kaikille paitsi diffuusiovakioille on ylimääräinen sovitekerroin yhtälössä (4.2) kuvattua korjaustermiä varten, jos ja vain jos korttia käytetään HEXBU-3D:ssä. CRFIT-ohjelma laskee sovitekertoimet CAXMAN-ohjelman luomien diffuusioparametrit sisältävien binääritiedostojen avulla.

Taulukko 8. Dopplerin vaikutuksen sovitekertoimia vastaavat MOD5-vakiot HEXBU-3D:n syötetiedostossa.

/DOPLER/	d_1	c_1^2	c_2^2	c_1^3	c_2^3	c_1^4
	c_2^4	c_1^6	c_2^6	c_1^7	c_2^7	c_1^8
	c_2^8	c_1^9	c_2^9			

Xenon- ja samariumkorjauksia varten tarvittavat parametrit poimitaan ksenonin, jodin ja samariumin fissiotuotokertoimien osalta suoraan cax-tiedoston MIS-lohkosta. CAXMAN laskee ksenonvuon jakamalla luvun $2,093 \cdot 10^{-5}$ cax-tiedoston POL-lohkosta poimitulla Xe-135:n mikroskooppisella vaikutusalalla, jota ohjelma on kertonut arvolla 10^{24} (barnit muutetaan neliösenttimetreiksi). Samariumvuolle käytetään samaa menetelmää, jossa POL-lohkosta poimitaan Sm-149:n mikroskooppinen vaikutusala ja jaettava luku on $3,566 \cdot 10^{-6}$. Xenon- ja samariumparametrit asetetaan HEXBU-3D:n syötetiedostoihin XENON- ja SAMAR-korteilla, joiden formaatti on edellä esiteltyjen korttien mukainen. XENON-kortissa on neljä parametria seuraavassa järjestyksessä: nipun palama, xenonin fissiotuotto, ksenonvuo ja jodin fissiotuotto. SAMAR-kortin formaatti on samanlainen, mutta se sisältää ainoastaan kolme parametria: nipun palaman, samariumin fissiotuoton ja samariumvuon.

Edellä mainittujen korttien lisäksi CAXMAN poimii cax-tiedostosta lisädataa HEXBU- ja ELSI-ohjelmien syötetiedostojen NOMCON-kortteihin. CAXMAN laskee ohivirtausosuuden poimimalla cax-tiedoston HYD-lohkosta suojakotelon sisäisen virtauspinta-alan, jakamalla sen samasta lohkosta poimitulla kokonaisvirtausalalla ja vähentämällä tuloksen ykkösestä. Lisäksi HYD-lohkosta poimitaan jäähdytteen tiheydet taulukon 2 eri tapauksissa (moderaattorin tiheyttä ei poimita). Boorikonsentraatio, polttoainepelletin ja jäähdytteen lämpötilat sekä tehotiheys poimitaan cax-tiedoston TTL-lohkosta (tai TIT-lohkosta, jos ohjelma on CASMO-4E). CASMO-ohjelmissa lämpötilan yksikkö on kelvin ja HEXBU- ja ELSI-ohjelmissa celsiusaste, joten CAXMAN vähentää poimituista lämpötiloista (täsmälleen) 273. Keskimääräinen väkevöintiaste nollapalamalla poimitaan cax-tiedoston SIM-lohkosta. Taulukkoon 9 on lopuksi vielä koottu ksenon- ja samariumparametrien sekä NOMCON-korttiin poimittavien parametrien lähteet CASMO-ohjelman cax-tiedostosta.

Taulukko 9. Ksenon- ja samariumparametrien sekä NOMCON-kortin parametrien lähteet cax-tiedostosta.

Parametri	Cax-tiedoston lohko
Ksenonin fissiotuotto	MIS
Ksenonvuo	POL
Jodin fissiotuotto	MIS
Samariumin fissiotuotto	MIS
Samariumvuo	POL
Ohivirtausosuus	HYD
Jäähdytteen tiheys	HYD
Boorikonsentraatio	TTL
Polttoainepelletin lämpötila	TTL
Jäähdytteen lämpötila	TTL
Tehotiheys	TTL
Väkevöintiaste nollapalamalla	SIM

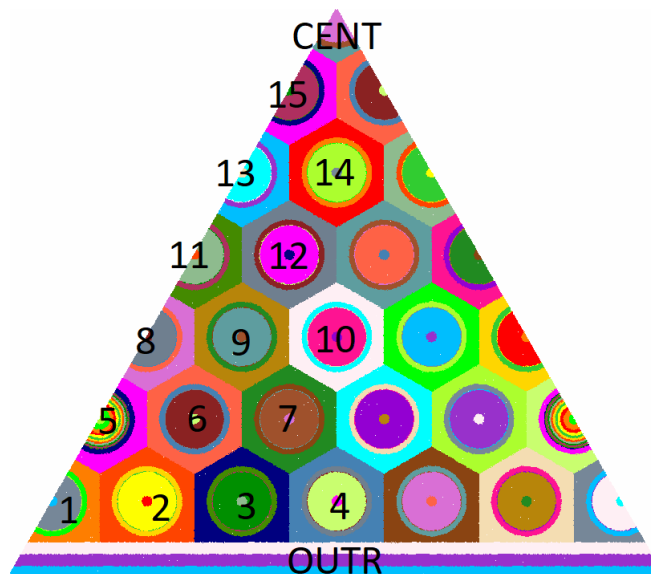
4.3 Ryhmävaikutusalojen jälkikäsitteily

Tässä luvussa kuvataan korjaukset, jotka CAXMAN-ohjelma on historiallisesti tehnyt CASMO-4E-ohjelman tuottamiin ryhmävaikutusaloihin (mukaan lukien diffuusiovakiot), joita käytetään ELSI-1440-ohjelmassa. Korjaukset koskevat hilan kulmassa sijaitsevaa polttoainesauvaa ja nippujen välistä aluetta. Korjaukset kuvaamalla voidaan helpommin perustella muutokset, jotka CAXMAN-ohjelmaan on täytynyt tehdä CASMO5-ohjelmaa varten.

ELSI-1440-ohjelman MOD5-vakioiden luomista varten CAXMAN lukee cax-tiedoston ACS-lohkosta taulukossa 7 esitetyt ryhmävaikutusalat jokaiselle laskentahilan makroalueelle, jotka on määritelty CASMO-syötetiedoston AVE-korteissa⁶. Kyseiset makroalueet

⁶Kaikki tässä luvussa käytetyt makroalueiden nimet tulevat historiallisesti CASMO-ohjelman AVE-korteissa käytetyistä nimistä. Kyseisellä kortilla voidaan pyytää cax-tiedoston AFL-lohkoon dataa tietyille makroalueelle käyttäjän valitsemalla nimellä. Tätä toiminnallisuutta hyödynnetään tiedon parsimiseen CAXMAN-ohjelmassa.

on merkattu kuvaan 5 numeroilla 1 – 15 (polttoainesauvat ja niitä ympäröivä jäähdyte; lyhyesti ”sauvakoppi”), kirjainyhdisteellä ”CENT” (keskusputki ja ympäröivä jäähdyte) ja kirjainyhdisteellä ”OUTR” (sisäinen vesirako, suojakotelo ja ulkoisen vesiraon puolikas). OUTR-alueella kuvataan ELSI-1440 käyttämässä mallissa nippujen välinen alue. Hilan oikea puoli on vasemman puolen peilikuva ulkoreunan keskinormaalien suhteen (ks. myös kuvat 1 ja 2) , joten oikean puolen makroalueiden diffuusioparametreja ei kerätä. Lisäksi CAXMAN lukee AFL-lohkosta jokaisen kuvassa 5 nimetyn makroalueen integroidun ja aluekeskiarvoistetun neutronivuon nopeassa ryhmässä, mitä tarvitaan makroalueiden sauvahilan kulmassa sijaitsevan sauvakopin (makroalue 1) ja nippujen välisen alueen (makroalue OUTR) vaikutusalojen korjaamiseen.



Kuva 5. CASMO-ohjelmille käytetyt makroaluenimitykset CASMO5-ohjelman luomassa mikroaluekuvassa esitettynä polttoaineen A kiinteällä nipulla.

Edellä mainittujen makroalueiden ryhmävaikutusaloja täytyy korjata, koska ELSI-1440-ohjelman käyttämässä mallissa jokaisen polttoainesauvaa kuvaavan makroalueen pinta-ala on samankokoinen, mutta CASMO-ohjelmissa kulmassa sijaitsevan sauvan makroalueen pinta-ala on pienempi kuin muiden sauvakoppien. Jokaisen kopin (siis myös kulmakopin) polttoainealueen pinta-ala on kuitenkin CASMO-mallissa sama, joten CASMO-mallissa kulmakopissa olevan jäähdytteen pinta-alan suhde polttoainesauvan pinta-alaan on pienempi kuin muissa kopeissa. Tällöin kulmakopin polttoaine saa ryhmävaikutus-

aloissa liikaa painoarvoa, jos CASMO-ohjelman laskemia ryhmävaikutusaloja ainoastaan skaalattaisiin vastaamaan ”normaalin” kokoisen ei-kulmakopin ryhmävaikutusaloja. CAXMAN-ohjelma tekee korjaukset kulmakopin ryhmävaikutusaloille uudelleenhomogenisoinnilla, jossa kulmakoppeihin efektiivisesti lisätään vettä sisäisestä vesiraosta, jota merkitään kirjainyhdistelmällä ”IGAP”. Olkoon kulmakoppia vastaavan makroalueen pinta-ala CASMO-mallissa A_1 ja ei-kulmakoppia vastaavan makroalueen pinta-ala A_2 . Kulmakopin ryhmävaikutusalan korjattu arvo $\Sigma_{\text{kor,kulma}}$ on CASMO-4E-ohjelmaa käytettäessä laskettu CAXMAN-ohjelmassa yhtälöstä:

$$\Sigma_{\text{kor,kulma}} = \frac{\frac{A_1}{A_2} \phi_{1,\text{ave}} \Sigma_1 + \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) \phi_{\text{IGAP,ave}} \Sigma_{\text{IGAP}}}{\frac{A_1}{A_2} \phi_{1,\text{ave}} + \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) \phi_{\text{IGAP,ave}}}, \quad (4.3)$$

missä $\phi_{1,\text{ave}}$ ja $\phi_{\text{IGAP,ave}}$ ovat aluekeskiarvoistetut neutronivuot joko nopeassa tai termisessä energiaryhmässä (sama korjaus tehdään myös diffuusiovakioille, mutta korjaus tehdään diffuusiovakion käänteisluvulle eli käytännössä transportvaikutusalalle). Jos esimerkiksi paikasta riippuvaa joko nopeaa tai termistä energiaryhmää kuvaava neutronivuo on ϕ , niin tällöin kulmakopin aluekeskiarvoistettu vuo energiaryhmässä on muotoa

$$\phi_{1,\text{ave}} = \frac{\int_{S_1} \phi(\vec{r}) dA}{A_1}, \quad (4.4)$$

missä S_1 kuvaa kulmakoppialuetta. Samanlainen yhtälö pätee sisäisen vesiraon aluekeskiarvoistetulle vuolle, mutta pinta-ala A_1 on korvattu sisäisen vesiraon pinta-alalla. Yhtälö (4.3) on mahdollista johtaa lähtemällä liikkeelle perinteisestä ryhmävakioille käytetystä homogenisointimääritelmästä. Sisäistä vesirakoa kuvaavan IGAP-alueen jäähdetepinta-ala, joka on lisättävä kulmakoppiin, jotta sen jäähdetetilavuus on sama kuin muilla kopeilla, on selvästi $A_2 - A_1$. Merkataan kulmakoppiin lisättyä heterogeenistä aluetta S_{coo} . Kun tämän alueen jäähdetetilavuus lisätään kulmakoppiin, kulmakoppialueen S_1 ja lisätyn jäähdetteen alueen S_{coo} yli homogenisoitu ryhmävaikutusala Σ_{hom} on:

$$\begin{aligned}
\Sigma_{\text{hom}} &= \frac{\int_{S_1} \phi(\vec{r}) \Sigma(\vec{r}) dA + \int_{S_{\text{coo}}} \phi(\vec{r}) \Sigma(\vec{r}) dA}{\int_{S_1} \phi(\vec{r}) dA + \int_{S_{\text{coo}}} \phi(\vec{r}) dA} \\
&= \frac{\frac{A_1}{A_2} \phi_{1,\text{ave}} \Sigma_1 + \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) \phi_{\text{coo,ave}} \Sigma_{\text{coo}}}{\frac{A_1}{A_2} \phi_{1,\text{ave}} + \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) \phi_{\text{coo,ave}}}, \tag{4.5}
\end{aligned}$$

missä ensimmäinen yhtäsuuruus seuraa tavallisesta homogenisointimääritelmästä ja toisessa yhtäsuuruudessa esimerkiksi kulmakopin alueen yli integroinnissa on käytetty re-laatioita:

$$\int_{S_1} \phi(\vec{r}) \Sigma(\vec{r}) dA = A_1 \frac{\int_{S_1} \phi(\vec{r}) dA}{A_1} \frac{\int_{S_1} \phi(\vec{r}) \Sigma(\vec{r}) dA}{\int_{S_1} \phi(\vec{r}) dA} = A_1 \phi_{1,\text{ave}} \Sigma_1. \tag{4.6}$$

Edellä ei ole määritelty, mitä kohtaa sisäisestä vesiraosta alue S_{coo} kuvaa. Tarkan korjauksen saamiseksi alueen S_{coo} pitäisi olla osa sisäistä vesirakoa, joka on yhteydessä kulmakoppiin. Yhtälö (4.3) on yhtälön (4.5) approksimaatio, kun oletetaan, että aluekeskiarvoistettu vuo ja reaktionopeudet alueessa S_{coo} , eli kulmakoppiin yhteydessä olevassa sisäiseen vesirakoon kuuluvassa alueessa, ovat samat kuin koko sisäisessä vesiraossa.

Kulmakopin ryhmävaikutusalojen korjauksen lisäksi on huomioitava, että sisäisestä vesiraosta on poistettava jäähtymäärä, joka siitä on lisätty kulmakoppeihin. Tämä tarkoittaa, että CASMO-mallin nippujen välistä aluetta kuvaavan OUTR-alueen ryhmävaikutusaloja joudutaan myös korjaamaan ennen kuin niitä voidaan käyttää ELSI-1440-ohjelmassa. Tätä ennen on kuitenkin myös huomioitava, että CASMO- ja ELSI-mallin mukaiset nippujen välisten alueiden pinta-alat eroavat, vaikka kulmakoppikorjausta ei tehtäisi. Kuten edellä on mainittu, ELSI-1440-ohjelman käyttämässä mallissa nippujen välistä aluetta kuvataan kopeilla, joiden pinta-ala on sama kuin sauvakopeilla. Tämä johtaa epätodelliseen tilanteeseen, sillä nippujen välistä aluetta ei todellisuudessa voida täyttää sauvakopin kokoisilla alueilla. Tilanne korjataan skaalaamalla CASMO-ohjelman laskeman OUTR-alueen vaikutusaloja. Oletetaan ensin, että sisäisestä vesiraosta poistetusta vesimäärästä johtuvaa korjausta ei tarvitsisi tehdä. Tällöin, jotta reaktionopeudet säilyvät siirryttäessä CASMO-mallista ELSI-1440-malliin, ELSI-1440-ohjelman nippujen välistä aluetta ku-

vaavat ryhmävaikutusalat $\Sigma_{\text{ELSI,ulko}}$ täytyy skaalata kuten

$$\Sigma_{\text{ELSI,ulko}} = \frac{A_{\text{OUTR}}}{A_{\text{ELSI,ulko}}} \Sigma_{\text{OUTR}}, \quad (4.7)$$

missä A_{OUTR} ja Σ_{OUTR} ovat vastaavasti CASMO-mallin mukaiset nippujen välistä aluetta kuvaavat pinta-ala ja ryhmävaikutusala ja $A_{\text{ELSI,ulko}}$ ELSI-1440-mallin mukainen nippujen välistä aluetta kuvaava pinta-ala. ELSI-1440-mallissa nippujen välistä aluetta kuvataan yhteensä 42 kopilla, joiden pinta-ala on siis sama kuin sauvakopeilla. Nippujen välistä aluetta kuvaavista kopeista 36 on yhteisiä kahdelle nipulle ja kuusi on yhteisiä kolmelle nipulle. Luvun 3.3 kuva 4 selventää tilannetta. Näin ollen nippujen välisen alueen pinta-ala saadaan yhdelle nipulle 20 kokonaisen nippujen välistä aluetta kuvaavan kopin pinta-alana. Siten $A_{\text{ELSI,out}}$ on $20A_2$, missä A_2 on edellä käytetty ei-kulmakoppia vastaavan sauvakopin pinta-ala. CAXMAN-ohjelma tekee kulmakoppikorjauksessa poistuvan vesimäärän takia lisäkorjauksen ryhmävaikutusalaan $\Sigma_{\text{ELSI,ulko}}$, missä poistuvan vesimäärän oletetaan ainoastaan pienentävän OUTR-alueen pinta-alaa, eikä se muuta OUTR-alueen ryhmävaikutusaloja. Tarkkaan ottaen sisäisen vesiraon pienentyminen OUTR-alueessa oletettavasti muuttaa myös hieman OUTR-alueen ryhmävaikutusaloja, koska sisäisen vesiraon paino pienenee suhteessa suojakoteloon ja ulkoisen vesiraon puolikkaaseen. Vaikutuksen suuruutta ei ole kuitenkaan testattu tässä työssä. Periaatteessa OUTR-alueen ryhmävaikutusalojen kulmakoppikorjauksesta aiheutuva muutos voitaisiin huomioida melko pienellä ohjelmointipanoksella, koska CASMO-ohjelmien cax-tiedostot sisältävät suoraan tarpeellisen datan yhtälön (4.3) mukaiseen uudelleenhomogenisointiin.

CASMO-ohjelman cax-tiedosto ei suoraan sisällä CASMO-mallin OUTR-alueen pinta-alaa A_{OUTR} , eikä myöskään kulmakoppien tai tavallisten koppien pinta-aloja. CAXMAN-ohjelma laskee pinta-alat jakamalla alueiden yli integroidut ryhmäneutronivuot alueiden yli keskiarvoistetuilla ryhmäneutronivoilla. Tällöin saadaan OUTR-alueen pinta-ala täyden symmetrian hilassa ja jos pinta-ala lasketaan sauvakopille, saadaan kuuden rotaatiosymmetrisen kopin yhteispinta-ala. Alueintegroidut vuot ilmoitetaan cax-tiedostossa siis täyden symmetrian hilalle, eikä vain 60 asteen symmetriasektorille. Yhtälössä (4.3) voidaan käyttää täyden symmetrian pinta-aloja ja keskiarvoistettuja neutronivoita, koska ”virhe” kumoutuu pois termeissä A_1/A_2 sekä aluekeskiarvoistetuissa voissa, mutta las-

kettujen pinta-alojen suuruus on huomioitava nippujen välistä aluetta kuvaavien ryhmävaikutusaloiden korjauksessa.

Nippu sisältää yhteensä kuusi kulmakoppia, joten kulmakoppikorjauksen takia CASMO-mallin sisäisestä vesialueesta poistuva vesimäärä on ei-kulmakopin ja kulmakopin pinta-alojen erotus kerrottuna kuudella. CAXMAN-ohjelman tekemä lopullinen korjaus OUTR-alueen ryhmävaikutusaloihin on siten:

$$\begin{aligned}\Sigma_{\text{kor,ulko}} &= \frac{A_{\text{OUTR}} - 6(A_2 - A_1)}{20A_2} \Sigma_{\text{OUTR}} \\ &= \frac{A_{\text{OUTR}} - (A_{2,\text{tot}} - A_{1,\text{tot}})}{\frac{20A_{2,\text{tot}}}{6}} \Sigma_{\text{OUTR}},\end{aligned}\tag{4.8}$$

missä $A_{1,\text{tot}}$ on kuuden kulmakopin ja $A_{2,\text{tot}}$ kuuden ei-kulmakopin yhteispinta-ala, mitkä CAXMAN-ohjelmaa laskee cax-tiedostosta poimituista aluekeskiarvoistetuista ja alueintegroiduista vuoarvoista. Jälkimmäisen yhtäsuuruuden jälkeinen lauseke on muodostettu, koska sitä käytetään CAXMAN-ohjelmassa.

Yhtälöiden (4.3) ja (4.8) ryhmävaikutusalat Σ_1 , Σ_{IGAP} ja Σ_{OUTR} poimitaan suoraan cax-tiedoston ACS-lohkosta. Keskiarvoistetut neutronivuot ja alueiden yli integroidut neutronivuot poimitaan suoraan cax-tiedoston AFL-lohkosta. Poikkeus on ELSI-1440-ohjelman tarvitsema poistovaikutusala, joka joudutaan laskemaan, sillä ACS-lohko ei suoraan sisällä poistovaikutusala samalla tavalla kuin POL-lohko sisältää sen HEXBU-3D-ohjelmalle. CAXMAN-ohjelma laskee poistovaikutusalan Σ_{rem} jokaiselle makroalueelle yhtälöstä:

$$\Sigma_{\text{rem}} = \Sigma_{12} - \frac{\phi_2}{\phi_1} \Sigma_{21}\tag{4.9}$$

poimimalla cax-tiedoston ACS-lohkosta makroalueiden siirtymävaikutusalat Σ_{12} ja Σ_{21} ja AFL-lohkosta makroalueiden aluekeskiarvoistetut nopean ja termisen ryhmän neutronivuot ϕ_1 ja ϕ_2 . Edellinen siirtymävaikutusala kuvaa sirontaa nopeasta termiseen ryhmään ja jälkimmäinen sirontaa termisestä ryhmästä nopeaan ryhmään. Poistovaikutusalat korjataan CAXMAN-ohjelmassa kulmakopille yhtälöllä (4.3) ja nippujen väliselle alueelle yhtälöllä (4.8) vasta sen jälkeen, kun ne on luotu yhtälöllä (4.9).

4.4 Laskentajärjestelmään tehdyt muutokset CASMO5-ohjelmaa varten

Tässä luvussa kuvataan muutokset, jotka MOD5-vakioiden laskentajärjestelmään on tehty, jotta sitä voidaan käyttää CASMO5-ohjelmalla. Käytännössä CASMO5-ohjelman syötetiedostoihin ja res-tiedostojen käsittelyyn liittyviä muutoksia lukuun ottamatta, kaikki oleelliset muutokset on tehty CAXMAN-ohjelmaan. Tehdyt muutokset eivät ole työmäärällisesti suuria, mutta ne ovat välttämättömiä laskentajärjestelmän oikeanlaisen toiminnan kannalta.

Laskentajärjestelmässä syntyvä res-tiedosto sisältää CASMO-ohjelman tilapisteitä, jotka CASMO on tallentanut tiedostoon nimellisessä tehotilassa tehdyn laskennan aikana. Tallennetuista tilapisteistä laskenta käynnistetään uudelleen nollatehotiloissa taulukon 2 eri tapauksissa. CASMO-4E sisältää ominaisuuden, jolla laskenta res-tiedostolla voidaan käynnistää komentoriviltä. Tätä toiminnallisuutta on historiallisesti hyödynnetty laskentajärjestelmän apuohjelmissa, mutta CASMO5-ohjelmassa samanlaista optiota ei ole. Tämän vuoksi apuohjelmien osalta laskentajärjestelmää muutettiin siten, että res-tiedostot annetaan CASMO-ohjelmalle tätä tarkoitusta varten olevaa FIL-korttia hyödyntämällä, mikä löytyy sekä CASMO-4E että CASMO5-ohjelmista. Laskentajärjestelmässä jokaiselle polttoaineelle syntyy laskennan aikana res-tiedosto, jonka tiedostonimi liittyy laskettavaan polttoaineeseen ja se on siten erilainen, kun eri polttoaineita käytetään. Apuohjelmaa muokattiin siten, että se luo geneerisellä nimellä symbolisen linkin, joka asetetaan viittaamaan syntyneeseen res-tiedostoon. Käyttämällä nollatehotilojen CASMO-syötetiedostojen FIL-korteissa symbolisen linkin geneeristä nimeä, nollateholaskenta voidaan käynnistää res-tiedostolla polttoaineen nimestä riippumatta.

CASMO5-ohjelman tuottamasta cax-tiedostosta varmistettiin, että se sisältää kaikki luvussa 4.2 mainitut lohkot, jotka tarvitaan MOD5-vakioiden luomiseen. Lisäksi varmistettiin, että CAXMAN-ohjelma lukee cax-tiedoston lohkon datan oikealla Fortran-formaatilla (käytännössä siis varmistettiin, että numeerinen data luetaan oikealta riviltä oikeasta sarakkeesta). Muutokset jouduttiin tekemään ainoastaan TTL-lohkon ja ADF-lohkon luentaan. TTL-lohkon nimi on CASMO-4E-ohjelmassa ”TIT” ja tarvittavat parametrit sijaitsevat siinä eri sarakkeissa. ADF-lohkon luennan muutos liittyy erilaiseen epäjatkuuus-

tekijöiden ilmoitustapaan CASMO-ohjelmissa. CASMO-laskenta tehdään laskentajärjestelmässä kuvan 5 mukaisessa heksagonaalisen hilan 60 asteen symmetriasektorissa, missä laskenta-alue on kolmion muotoinen. CASMO-4E-ohjelman cax-tiedoston ADF-lohkossa ilmoitetaan ainoastaan yksi epäjatkuuustekijän arvo kaikille reunoille, mutta CASMO5-ohjelman cax-tiedoston ADF-lohkossa ilmoitetaan epäjatkuuustekijät kolmelle reunal- le, joista ainoastaan yksi vastaa laskenta-alueen ulkoista reunaa (OUTR-aluetta vastaava reuna kuvassa 5). ADF-lohkon luentaa muutettiin niin, että CAXMAN poimii nopean ja termisen ryhmän epäjatkuuustekijät sarakkeesta, jossa epäjatkuuustekijät vastaavat tätä ulkoista reunaa ("SOUTH"-reuna ADF-lohkossa).

Yksinkertaiset mutta merkittävät muutokset luvussa 4.3 kuvattuihin ryhmävaikutusalojen korjauksiin jouduttiin tekemään CASMO5-ohjelmaa varten. Muutokset johtuvat tavas- ta, jolla CASMO5-ohjelman makroalueiden pinta-alat lasketaan CAXMAN-ohjelmassa. CASMO-4E-ohjelmaa käytettäessä CAXMAN-ohjelma laskee jokaisen sauvakopin pinta- alan aina täyden symmetrian hilan symmetriapaikoilla sijaitsevien sauvakoppien yhteis- pinta-alana. Tämä koskee siis myös niitä sauvakoppeja, jotka sijaitsevat symmetria-akse- lilla (makroalueet 1, 5, 8, 11, 15, 13 ja CENT kuvassa 5). Kun siis esimerkiksi kuvan 5 symmetria-akselilla sijaitsevan makroalueen 5 pinta-ala lasketaan CAXMAN-ohjelmassa jakamalla alueintegroitu vuo aluekeskiarvoistetulla neutronivuolla, saadaan pinta-ala, jon- ka koko on kuusi kertaa täyden symmetrian hilassa sijaitsevan sauvakopin pinta-ala (ts. kuuden kokonaisen sauvakopin pinta-ala). CASMO5-ohjelmaa käytettäessä CAXMAN- ohjelma laskee samalla menetelmällä symmetria-akselilla sijaitseville sauvakopeille pinta- alan, jonka koko on kuusi kertaa 60 asteen symmetriasektorissa sijaitsevan sauvakopin pinta-ala. Näin ollen CASMO5-ohjelmalla symmetriasektorissa sijaitsevalle sauvakopil- le lasketaan pinta-ala, jonka koko on puolet siitä, joka saadaan CASMO-4E-ohjelmalla. Tällä ei oletettavasti ole merkitystä symmetriasektorissa sijaitsevien sauvakoppien ryh- mävaikutusaloihin, sillä ryhmävaikutusalojen laskennassa käytettävässä tilavuuspaino- tuksessa pinta-alojen erot CASMO-4E ja CASMO5-ohjelmissa kumoutuvat, eikä tämän takia ole väliä käytetäänkö kokonaisen sauvakopin vai symmetria-akselin suhteen puo- litetun sauvakopin ryhmävaikutusalaa. Kulmakoppi on kuitenkin poikkeus, sillä pinta- alojen erot eivät kumoudu pois yhtälön (4.3) korjauksessa termissä A_1/A_2 , jossa osoittaja on symmetria-akselilla sijaitsevan kopin pinta-ala ja nimittäjä kokonaisen kopin pinta-

ala. Lisäksi nippujen välisen alueen ryhmävaikutusaloille tehtävässä korjauksessa (4.8) OUTF-alueesta poistetaan puolet liian vähän pinta-alaa CASMO5-ohjelmaa käytettäessä.

Kulmakoppiin tehtävän korjauksen (4.8) muutos on erityisen tärkeä. Jos korjausta ei muuteta, kun CASMO5-ohjelma on käytössä, kulmakopin ryhmävaikutusalat ovat pahasti virheelliset. Esimerkiksi kuvan 2 polttoaineella B tehdyssä tasapainolatauksen laskussa, lineaaritehovara käytännössä hävisi jakson aikana ja joissakin palamapisteissä lineaariteho jopa ylitti sallitun 325 W/cm rajan. Tarvittavien muutosten tekeminen on onneksi selvää yhtälöiden (4.3) ja (4.8) perusteella: CASMO5-ohjelmaa käytettäessä kulmakoppia vastaavia pinta-aloja on ainoastaan kerrottava kahdella. Näin kompensoidaan ero kulmakopin pinta-alassa suhteessa CASMO-4E ohjelmalla laskettuun pinta-alaan. Tällöin siis yhtälössä (4.3), kerroin A_1/A_2 on muutettu muotoon $2A_1/A_2$ ja yhtälössä (4.8) kerroin $A_{1,tot}$ on muutettu muotoon $2A_{1,tot}$, kun CASMO5-ohjelmaa käytetään laskentajärjestelmässä.

Taulukossa 10 on esitetty kuvan 5 mukaiset makroalueiden pinta-alojen suhteet, kun pinta-alat on laskettu CAXMAN-ohjelmassa käytetyllä menetelmällä. Taulukon perusteella voidaan varmistua siitä, että symmetriasektorin sauvakoppien pinta-alat ovat todella ainoita makroalueita, joiden pinta-alat eroavat CASMO-ohjelmien välillä. Erityisesti CASMO5-makroalojen pinta-aloista huomioidaan hilan reunassa sijaitsevien sauvakoppien 2, 3 ja 4 pinta-alat, jotka voisivat mahdollisesti erota hilan keskellä sijaitsevien sauvakoppien pinta-aloista niiden erilaisen muodon takia (ks. kuva 5). Jos reunassa sijaitsevien sauvakoppien pinta-alat eroaisivat muista kokonaisista sauvakopeista, CAXMAN-ohjelmaa täytyisi muuttaa lisää, sillä hilan reunassa sijaitsevien sauvakoppien pinta-alat eroaisivat ELSI-1440-malliin vaadituista pinta-aloista. Lisäksi CAXMAN-ohjelma käyttää oletuksena reunassa sijaitsevaa sauvakoppia 2 kuvaamaan hilan keskellä sijaitsevan kopin pinta-alaa A_2 , jota tarvitaan yhtälössä (4.3). Lopuksi huomautetaan, että CENT-aluetta eli keskusputkea vastaavien makroalueiden pinta-alat ovat samankokoiset CAXMAN-ohjelman käyttämällä menetelmällä CASMO-4E- ja CASMO5-ohjelmissa, vaikka CENT-alue sijaitsee symmetria-akselilla. Tätä ei pidä kuitenkaan erityisesti huomioida laskentajärjestelmässä.

Taulukko 10. CASMO-4E- ja CASMO5-ohjelmien makroalueiden pinta-alojen suhteet, kun pinta-alat on laskettu CAXMAN-ohjelman käyttämällä menetelmällä. CASMO5-pinta-aloja on jaettu vastaavilla CASMO-4E-pinta-aloilla. Pinta-alat on laskettu polttoaineen A jatkeella nollapalamalla.

Makroalue	Pinta-alojen suhde	Makroalue	Pinta-alojen suhde
1	0,5	10	1,0
2	1,0	11	0,5
3	1,0	12	1,0
4	1,0	13	0,5
5	0,5	14	1,0
6	1,0	15	0,5
7	1,0	OUTR	1,0
8	0,5	CENT	1,0
9	1,0		

CASMO5-ohjelmalle laskentajärjestelmässä annettuja syötetiedostoja muutettiin ohjelmassa havaitun virheen välttämiseksi. Studsvik Scandpowerilta saadun tiedon mukaan tässä työssä käytetty CASMO5-versio käsittelee virheellisesti nuklidit, jotka kuuluvat sen neutronidatankirjaston fissiotuotteiden hajoamisketjuihin. Fissiotuotteiden hajoamisketjut ja niihin kuuluvat nuklidit löytyvät viitteestä (Hykes et al., 2022b, 649). Virheen luonne on seuraava: jos fissiotuotteen hajoamisketjuun kuuluva nuklidi on määritelty kuuluvaksi ei-polttoainealueeseen (esimerkiksi polttoainesauvan suojakuoreen) ja jokin alueeseen kuuluvista nuklideista on asetettu palamaan CASMO5-syötetiedostossa, niin tällöin fissiotuotteiden hajoamisketjuun kuuluvan nuklidin atomitiheys nollautuu ensimmäisen palamapisteen jälkeen. Virhettä lieventää merkittävästi se, että nuklidit, jotka ovat periaatteessa osa fissiotuotteiden hajoamisketjuja, mutta joille CASMO5 ei käytä hajoamisketjuissa käytettyä nukliditunnusta, eivät ole virheen alaisia. Esimerkiksi zirkoniumnuklidien nukliditunnukset ei-polttoainealueessa poikkeavat tunnuksista, jotka niillä on fissiotuotteiden hajoamisketjuissa. Nukliditunnuksella tarkoitetaan viiden numeron sarjaa, jota käytetään nuklidien identifioimiseen CASMO-ohjelmissa.

Polttoaineiden A ja B ei-polttoainealueet sisältävät nuklidin Nb-93, johon yllä kuvattu virhe vaikuttaa. Virheellinen käytös on havaittavissa osassa ryhmävakioita, joihin se aiheuttaa epäjatkovaa käyttäytymistä nollannen palamapisteen ja sitä seuraavan palamapisteen välillä. Erityisesti virhe näkyy ”hyppynä” nopean ryhmän diffuusiovakiossa ja äärettömän hilan kasvutekijässä. Virheen merkitystä testattiin luvussa 5.3 kuvatulla tasapainolatauksella sydäntason laskussa HEXBU- ja ELSI-ohjelmien avulla. Testauksen perusteella virheellä on pieni vaikutus esimerkiksi tehojakaumiin ja termisiin marginaaleihin. Kriittiseen boorikonsentraation se aiheuttaa noin 10 ppm:n tasoeron (tämä koskee tietenkin vain polttoainetta B ja muilla polttoaineilla virheen vaikutus voi olla erilainen riippuen virheen alaisten nuklidien määrästä). Virheen välttämiseksi riittää, että ei-polttoainealueiden nuklideja ei aseteta palamaan CASMO5-ohjelman syötetiedostossa tai vaihtoehtoisesti, jos nuklideja asetetaan palamaan, varmistetaan, että myös fissiotuotteiden hajoamisketjuihin kuuluva nuklidi on asetettu palamaan. CASMO5-ohjelman suhteen päädyttiin tässä työssä jälkimmäiseen ratkaisuun: kaikissa laskentajärjestelmässä käytetyissä CASMO5-syötetiedostoissa ei-polttoainealueissa olevan hafniumin lisäksi myös virheen alainen nuklidi Nb-93 on asetettu palamaan. Tuotantokäyttöä ajatellen voi olla kuitenkin parasta, että ei-polttoainealueiden nuklideja ei aseteta palamaan, kunnes virheetön ohjelmaversio on saatavilla.

Viimeiset muutokset, joka laskentajärjestelmään on tehty, liittyvät CASMO5-ohjelman syötetiedostoihin. Muutoksia on tehty yhteensä viisi. edellä on kuvattu kaksi muutosta, jotka liittyvät FIL-korttien lisäämiseen ja fissiotuotteiden hajoamisketjuihin kuuluvan Nb-93-nuklidin atomitiheyden nollautumisen estämiseen. Loput kolme muutosta liittyvät nippujen välisen vesiraon lämpölaajenemiseen, perusmoodilaskennan eksplisiittiseen käynnistämiseen ja liikkuvan fissioenergian (engl. gamma smearing) osuuden säätöön. Nippujen välisen vesiraon lämpölaajentamisen muutos liittyy hieman erilaiseen lämpölaajenemismetodologioihin CASMO-ohjelmissa laskentajärjestelmässä käytetyillä syötetiedostoilla. CASMO-4E-ohjelma käyttää lämpölaajentamiseen aina moderaattorin (ei jäädytteen) lämpötilaa riippumatta siitä, mikä lämpötila asetetaan reaktorin tukirakenteiden (engl. core support structure) määrittämisessä käytettyyn CSS-korttiin (vesiraon lämpölaajeneminen on seurausta reaktorin tukirakenteiden lämpölaajenemisesta). CASMO5-ohjelma taas käyttää CSS-kortin lämpötilaa vesiraon lämpölaajentamiseen ja jos lämpö-

tilaa ei anneta eksplisiittisesti CSS-kortissa, ohjelma käyttää jäähdytteen (ei moderaattorin) lämpötilaa lämpölaajentamisessa. Jotta molemmat ohjelmat tekevät nippujen välisen vesiraon lämpölaajentamisen samalla tavalla vertailua ajatellen, CASMO-syötetiedostot luovaa apuohjelmaa muutettiin siten, että CASMO-ohjelmat käyttävät aina moderaattorin lämpötilaa vesiraon lämpölaajentamiseen. Jos tuotantokäytössä halutaan käyttää jäähdytteen lämpötilaa vesiraon lämpölaajentamiseen CASMO5-ohjelmalla, syötetiedostoissa CSS-kortin lämpötila on muutettava samaksi kuin jäähdytteen lämpötila. Neutronivuodon huomioivaa perusmoodilaskua ei oletuksena tehdä CASMO5-ohjelmassa, mutta CASMO-4E-ohjelmassa se tehdään. Perusmoodilaskennan käynnistämiseksi CASMO5-syötetiedostoon on lisätty FUM-kortti, jolla perusmoodilaskentaa hallitaan. CASMO5 käyttää oletuksen liikkuvan fissioenergian osuutena arvoa 9,5 %, joka eroaa CASMO-4E-ohjelman 7,0 % oletusarvosta (Hykes et al., 2022b, 341). CASMO5-syötetiedostojen liikkuvan fissioenergian osuus säädettiin SMR-kortilla arvoon 7,0 %, jota käytetään myös ELSI-1440-ohjelmassa sauvatehojen rekonstruktiossa. SMR-kortin vaikutusta CASMO5-ohjelmassa testattiin kahdessa palamalaskussa, jossa toisessa liikkuvan fissioenergian osuus asetettiin nolnaan ja toisessa arvoon 10 %. Cax-tiedostojen vertailun perusteella eroa ei syntynyt missään niissä lohkoissa, joita käytetään MOD5-vakioiden luomisessa. Näin ollen liikkuvan fissioenergian säätö on periaatteessa turhaa.

5 Validointimenetelmät

Tässä luvussa kuvataan CASMO5-ohjelman validointimenetelmät. Luku 5.1 liittyy Serpent 2 -vertailuun, luku 5.2 jälkikäsitteilyn seurauksena syntyvien diffuusioparametrien vertailuun, luku 5.3 tasapainolatausvertailuun ja luku 5.4 RESU-ohjelman offline-version laskennan perusteella tehtyyn mittausvertailuun.

5.1 Vertailu CASMO5-, CASMO-4E- ja Serpent 2 -ohjelmien välillä

Vertaamalla CASMO5:n laskemia tuloksia Monte Carlo -ohjelman Serpent 2 (Leppänen et al., 2015) laskemiin tuloksiin varmistetaan, että käytetty CASMO5-versio toimii oikein. Luku 5.1.1 käsittelee käytettyjä ohjelmien lähtöasetuksia, joilla ohjelmien välinen laskenta on mahdollisimman vertailukelpoista ja luku 5.1.2 Serpent 2:ssa käytettyjä lähtöasetuksia. Varsinaiset vertailutulokset on esitetty luvussa 6.1. Laskennassa simuloitava geometria on ääretön hila, jonka olosuhteet vastaavat taulukon 1 koppipalamalaskennassa käytettyä reaktorin nimellistilaa. Vertailu tehtiin luvussa 2 kuvatuilla polttoaineilla A ja B.

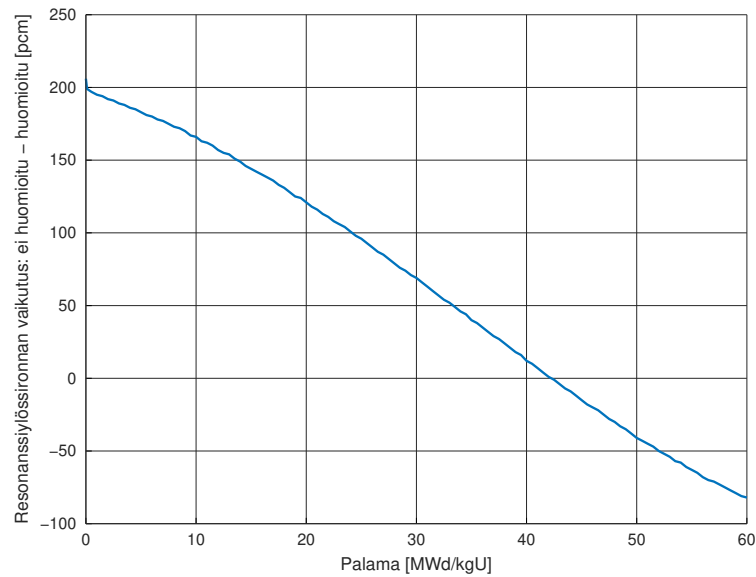
5.1.1 Toimenpiteet CASMO–Serpent-laskennan vertailukelpoistamiseksi

CASMO-ohjelmien ja Serpent 2:n tekemä laskenta tehtiin mahdollisimman vertailukelpoiseksi seuraavilla toimenpiteillä:

1. Materiaalitiedot annettiin Serpent 2:lle absoluuttisina atomitiheyksinä asettamalla mat-kortteihin materialien tiheysparametriksi ”sum”. Tämä mahdollisti sen, että atomitiheydet Serpent 2:lle voitiin poimia suoraan CASMO5-ohjelman luomasta mcp-tiedostosta, joka sisältää kaikkien CASMO5:n käyttämien materiaalien atomitiheydet. Atomitiheydet nollapalamalla sisältävät mcp-tiedostot jokaiselle polttoaineelle luotiin CASMO5:n MCP-kortilla. Näin ohjelmat saatiin käyttämään laskennassa mahdollisimman yhdenmukaisia materiaaleja: neutroniikan kannalta ainoas-

taan atomitiheyksillä on väliä, sillä niitä käytetään makroskooppisten vaikutusalojen laskentaan. Atomitiheydet poimittiin mcp-tiedostosta tätä tarkoitusta varten luodulla yksinkertaisella parserilla.

2. Jokaisen käytetyn materiaalin lämpötila asetettiin samaksi ohjelmien välillä (materiaalin lämpötila vaikuttaa esimerkiksi Dopplerin ilmiön kautta vaikutusaloihin).
3. Oletuksena CASMO5:n ja CASMO-4E:n polttoaineen mittoihin ja materiaali-
tiheyksiin tekemä lämpölaajeneminen kytkettiin pois päältä asettamalla CASMO-
ohjelmissa THE-kortilla eli kaikki ohjelmat käyttivät laskennassa kylmämittoja ja
-tiheyksiä.
4. Yksinkertaisuuden vuoksi välihilat jätettiin huomioimatta.
5. Resonanssiylössirontaa ei huomioitu. Todellisuudessa epitermisellä energia-alueella
oleva neutroni voi sirota ylöspäin tiettyjen nuklidien (esimerkiksi U-238) resonanssi-
sienergioiden lähellä ja ylössiroavien neutronien osuus materiaalissa kasvaa ma-
teriaalin lämpötilan kasvaessa (Lee et al., 2009, 276). Tästä seuraa, että Dopple-
rin reaktiivisuuserroin on myös pienempi, jos resonanssiylössironta huomioidaan.
Resonanssiylössironnan vaikutusta CASMO5:n laskemaan äärettömän hilan kasvu-
tekijään on havainnollistettu kuvassa 6 polttoaineen A jatkeella. Kuvasta havaitaan,
että resonanssiylössironnan huomioiminen pienentää kasvutekijää selvästi pienil-
lä palamalla. Vaikutus Dopplerin reaktiivisuuskertoimeen nollapalamalla on esitet-
ty taulukossa 11. Reaktiivisuuskertoimet on laskettu taulukon 1 mukaisessa tilassa
kasvattamalla polttoainepelletin lämpötilaa 100 K. Taulukosta havaitaan, että reso-
nanssiylössironnan huomioiminen pienentää Dopplerin reaktiivisuuserrointa nol-
lapalamalla noin 10 %.



Kuva 6. Resonanssiylössirontan vaikutus äärettömän hilan kasvutekijään CASMO5:ssä polttoaineen A jatkeella.

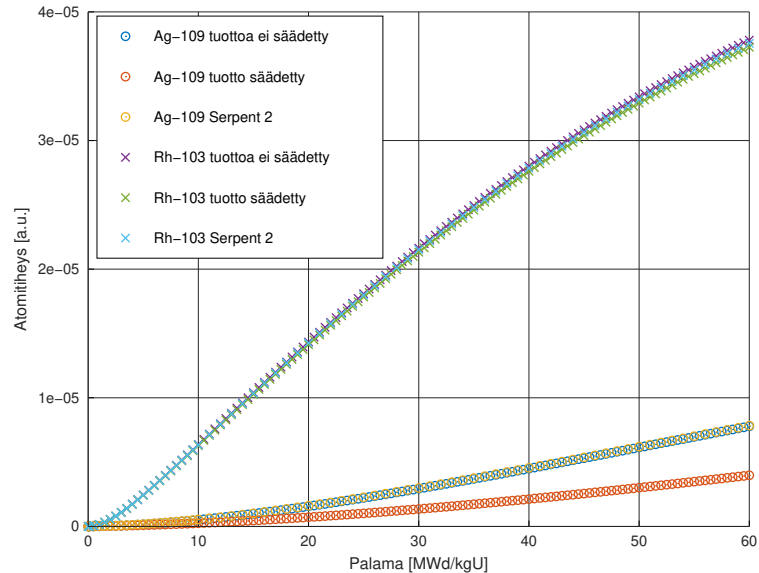
Taulukko 11. CASMO5:n laskema reaktiivisuusmuutos ilman resonanssiylössirontaa ja sen kanssa, kun polttoainepelletin lämpötila kasvaa 100 K nollapalamalla polttoaineen A jatkeella.

Resonanssiylössironta	Reaktiivisuusmuutos	Dopplerin reaktiivisuuskerroin
Ei huomioitu	-327 pcm	-3,27 pcm/K
Huomioitu	-360 pcm	-3,60 pcm/K

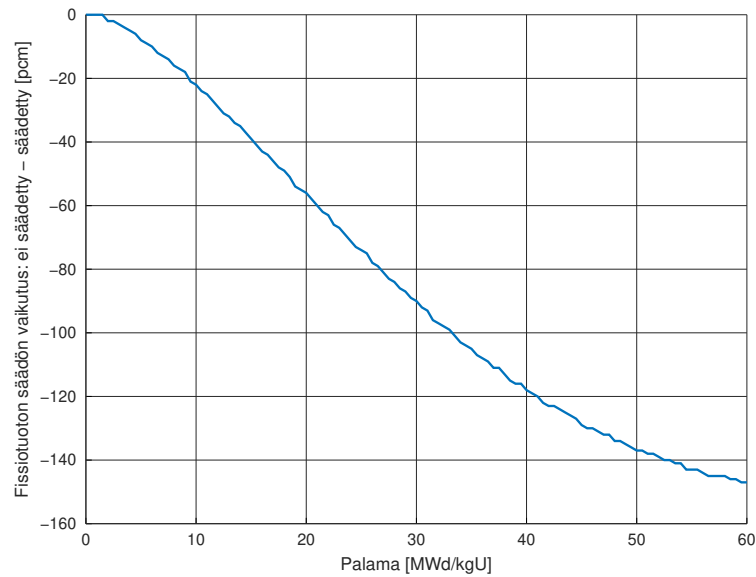
Resonanssiylössirontan huomioiminen otetaan CASMO5:ssä käyttöön RUP-kortilla. Ylössirontamallissa luvussa 3.1.1 mainittujen resonanssit huomioivien vaikutusalojen laskennassa käytettyjä resonanssi-integraaleja kerrotaan niin sanotulla ”ylössirontakorjauskertoimella” (engl. upscatter correction factor) (Hykes et al., 2022a, 37). Serpent 2:ssa resonanssiylössironta huomioidaan niin sanotulla DBRC-menetelmällä (engl. Doppler Broadening Rejection Correction) (Leppänen, 2015, 59). Resonanssiylössironta jätetään oletuksena huomioimatta molemmissa ohjelmissa, joten sitä ei tarvinnut erikseen kytkeä pois päältä ohjelmien syötetiedostoissa. CASMO-4E-ohjelmassa ylössirontamallia ei ole käytössä.

6. Ag-109 ja Rh-103 nuklidien atomitiheyksiin vaikuttava fissiotuoton ”säätö” (engl. fission yield adjustment) kytkettiin pois päältä CASMO5:ssä YIE1- ja YIE2-kor-

teilla. Sekä Ag-109 että Rh-103 ovat termisellä alueella $1/\nu$ -absorbaattoreita, jotka absorboivat neutroneita pääasiassa (n,γ) -reaktioiden kautta. Näin ollen niiden kertymä fissioista vaikuttaa polttoaineen reaktiivisuuteen. Ag-109 ja Rh-103 nuklidien kertymä eri CASMO5-asetuksilla on nähtävillä kuvasta 7 polttoaineen A jatkeella. Kuvasta havaitaan, että säädön ottaminen pois päältä antaa huomattavasti paremman vastaavuuden ohjelmien välillä Ag-109:n atomitiheydelle. Rh-103:lle fissiosäädön merkitys on pienempi. Fission tuoton säädön vaikutus äärettömän hilan kasvutekijään on nähtävillä kuvassa 8. Kuvan 7 perusteella fissiotuoton säädön ottaminen pois päältä selvästi kasvattaa Ag-109 nuklidien fissiokertymänopeutta verrattuna tilanteeseen, jossa fissiotuoton säätö on päällä. Tällöin on odotettavissa että polttoaineen kasvutekijä on pienempi kuin tilanteessa, jossa fissiosäätö on käytössä ja ero on sitä suurempi, mitä suurempi on polttoaineen palama. Kuva 8 tukee tätä odotusta. CASMO-4E:ssä Ag-109 ja Rh-103 nuklidien fissiotuoton säätöä ei ole mahdollista muuttaa kuten CASMO5:ssä.



Kuva 7. Fission tuoton säädön vaikutus Rh-103 ja Ag-109 atomitiheksiin CASMO5:ssä polttoaineen A jatkeella.

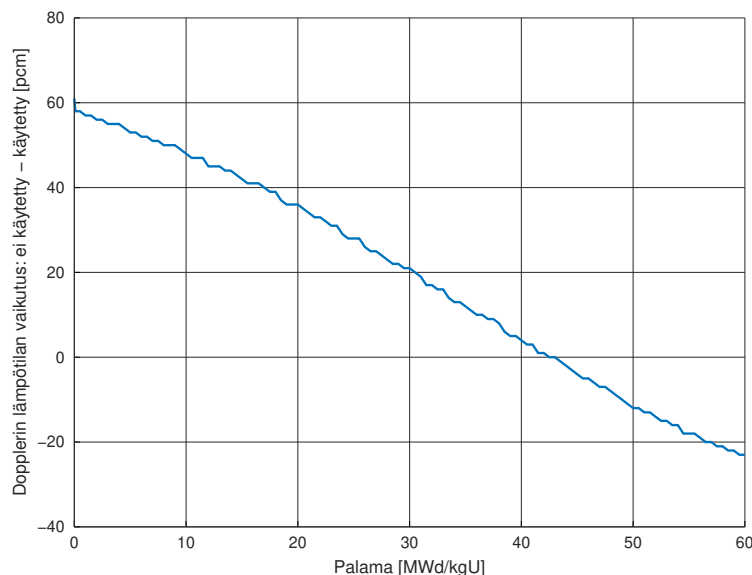


Kuva 8. Rh-103 ja Ag-109 nuklidien fissionuoton säädön vaikutus äärettömän hilan kasvutekijään CASMO5:ssä polttoaineen A jatkeella.

7. CASMO5:ssä oletuksena käytetty ”efektiivinen Dopplerin lämpötila” (engl. effective Doppler temperature) kytkettiin pois päältä DOP-kortilla. Luvussa 3.1.1 mainitut homogeenisen ongelman resonanssi-integraalit ottavat Dopplerin ilmiön huomioon olettamalla, että polttoainenuklidit ovat ”vapaana kaasuna” (engl. free gas), jolloin niiden vauhdin oletetaan noudattavan Maxwellin jakaumaa. Todellisuudessa uraanioksidin uraaniatomit ovat kemiallisesti sitoutuneena uraanioksidin kidehilaan, jonka värähtelyn takia uraaniatomeilla on keskimääräisesti suurempi liikeenergia kuin jos ne olisivat vapaana kaasuna. CASMO5 huomioi uraaniatomien sitoutumisen uraanioksidin kidehilaan määrittämällä efektiivisen Dopplerin lämpötilan, jota käyttämällä oikean lämpötilan tilalla kidehilaan sitoutuneet uraaniatomit voidaan ajatella vapaana kaasuna. Oletuksena CASMO5 interpoloi resonanssi-integraalit luvussa 3.1.1 mainitussa ekvivalenssiteoriassa käyttämällä Dopplerin lämpötilaa, joka on siis aina suurempi kuin oikea lämpötila. Ero Dopplerin lämpötilan ja oikean lämpötilan välillä on sitä suurempi, mitä pienempi oikea lämpötila on (yleisesti eron suuruusluokka on kymmeniä kelvineitä). (Hykes et al., 2022a, 30)

Kuvassa 9 on verrattu CASMO5:n ja Serpent 2:n laskemia äärettömän hilan kasvutekijöitä polttoaineen A jatkeella taulukon 1 mukaisessa tilassa. Reaktiivisuusvaikutus on maksimissaan jakson alussa noin 60 pcm ja odotettavasti Dopplerin lämpö-

tilaa käyttämällä reaktiivisuus on tällöin pienempi. Dopplerin lämpötilan käyttäminen heikentää CASMO5:n laskemien tuloksien vastaavuutta Serpent 2:n laskemiin tuloksiin, joten tämän vuoksi sitä ei käytetty vertailussa.

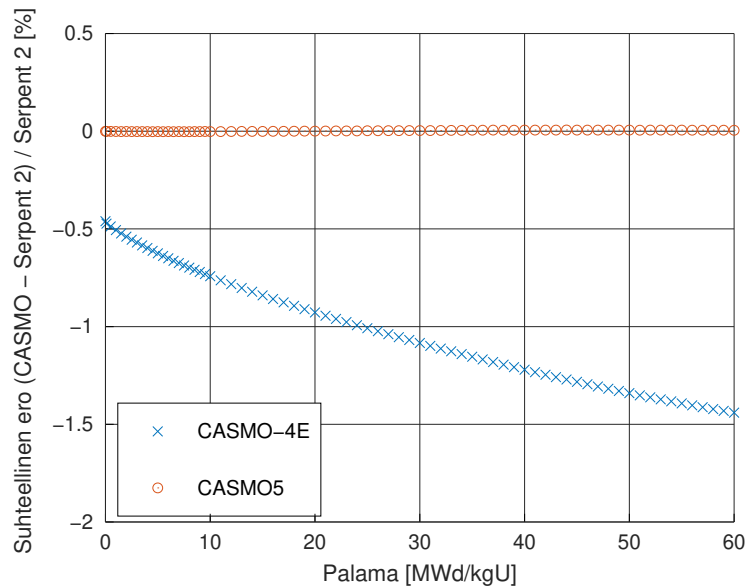


Kuva 9. Dopplerin lämpötilan käytön vaikutus äärettömän hilan kasvutekijään CASMO5:ssä polttoaineen A jatkeella.

8. CASMO5:n Pu-239 nuklidin vaikutusaladata vaihdettiin käyttämään Serpent 2:ssa käytetyn ENDF/B-VII.1 kirjaston dataa REP-kortilla. Oletuksena CASMO5 käyttää Pu-239:lle JENDL-4 kirjaston vaikutusaladataa (Hykes et al., 2022b, 340).
9. Fissionituvien nuklidien lämpötehon aiheuttava energia⁷ asetettiin mahdollisimman yhdenmukaiseksi CASMO5:n ja Serpent 2:n välillä. Tämä on tärkeää, sillä jos ohjelmissa eri nuklidit vapauttavat eri määrän energiaa per fissio, nuklidit palavat ohjelmissa erilaisilla nopeuksilla. Fissiossa vapautuvan energian yhdenmukaistaminen toteutettiin säätämällä Serpent 2:ssa ”fiss”-kortilla nuklidien lämpötehon aiheuttavaa energiaa (engl. heating value) CASMO5:ssä oletuksena käytettävien niin sanottujen Persic-Trkov-vakioarvojen (Hykes et al., 2022b, 331) mukaisiksi. CASMO5:ssä käytetyt Persic-Trkov-arvot voidaan lukea luvussa 3.1.4 mainitun cax-tiedoston ERF-lohkosta. Lämpötehon aiheuttavan energian säädön vaikutusta on

⁷Fissionituvan nuklidin lämpötehon aiheuttava energia on välittömästi ja viivellä fissiossa vapautuva energia, josta on vähennetty viiveellä betaminus-hajoamisten yhteydessä vapautuvien antineutriinoiden energia ja lisätty (n,γ)-neutronikaappausreaktioissa vapautuva energia.

havainnollistettu kuvassa 10 polttoaineen A jatkeella taulukon 1 mukaisessa tilassa. Kuvan perusteella ero Serpent 2:n ja CASMO5 välillä on hyvin pieni. CASMO-4E:n suhteen ero on merkittävämpi ja kasvaa palaman funktiona.



Kuva 10. Erot fissiossa keskimäärin vapautuvassa lämpötehon aiheuttavassa energiassa.

10. Neutronivuodon huomioivaa perusmoodilaskua ei tehty CASMO-ohjelmissa. CASMO-4E:ssä perusmoodilasku kytkettiin pois päältä FUM-kortilla. CASMO5:ssä perusmoodilaskua ei oletuksena tehdä.
11. Serpent 2 käytti laskennassa ENDF/B-VII.1-dataan perustuvia vaikutusala- fissionuotto- ja hajoamiskirjastoja. Näin CASMO5:n ja Serpent 2:n laskennassa tarvittava data perustui samaan lähteeseen. CASMO-4E käytti laskennassa ENDF/B-IV-kirjastoon perustuvaa dataa.
12. Ainoastaan polttoainepellettien nuklidien annettiin palaa laskennassa (oletus CASMO-ohjelmissa).
13. Xe-135 atomitiheyden annettiin muuttua vapaasti eli tasapainokonsentraatiota ei käytetty (oletus CASMO-ohjelmissa).

On syytä korostaa, että muissa tässä työssä tehdyissä validointilaskuissa CASMO-4E:n ja CASMO5:n lähtöasetukset eroavat tietyiltä osin Serpent 2 -vertailussa käytetyistä asetuksista. Seuraavat tuotannossa käytössä olevat CASMO-ohjelman asetukset ovat päällä muissa validointilaskuissa:

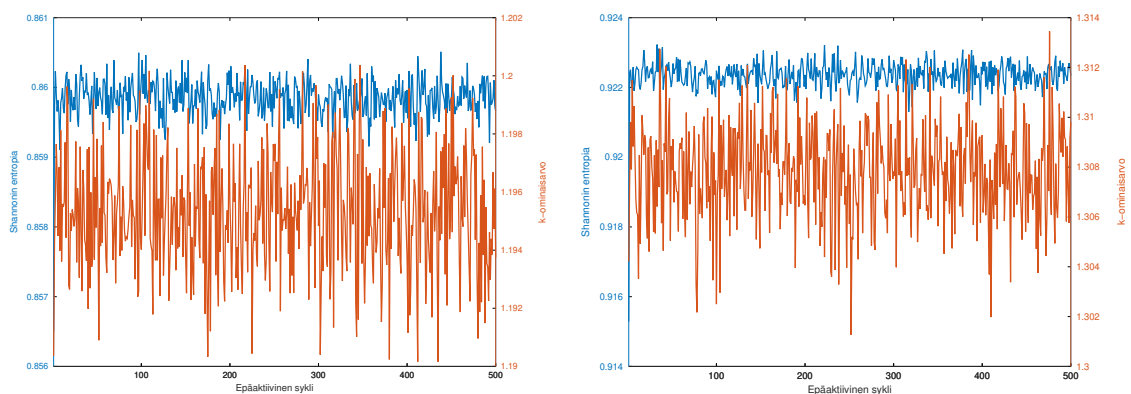
- mittojen ja tiheyksien lämpölaajentaminen
- välihiilojen homogenisointi
- neutronivuodon huomiointi perusmoodilaskulla
- polttoaineen komponenteissa (esimerkiksi suojakotelo) oleva hafnium on asetettu palamaan
- Xe-135 atomitiheydelle käytetään tasapainokonsentraatiota palamalaskun aikana
- Ag-109 ja Rh-103 fissiotuoton säätö (ainoastaan CASMO5)
- efektiivinen Dopplerin lämpötila (ainoastaan CASMO5)
- Pu-239:n vaikutusladatana käytetään JENDL-4-kirjaston dataa (ainoastaan CASMO5).

5.1.2 Serpent 2 -ohjelman lähtöasetukset

Serpent 2 -laskentaa varten ohjelmalle on määritettävä epäaktiivisten ja aktiivisten transportsykliden määrä sekä simuloitavien neutronien määrä per sykli. Epäaktiivisten syklien aikana fissiolähdejakauma konvergoituu perusmoodia vastaavaan tilaan, jonka jälkeen tuloksia kerätään aktiivisista sykleistä (Leppänen, 2015, 54). Serpent 2:ssa fissiolähdejakauman konvergoitumista voidaan tarkastella seuraamalla Shannonin entropiaa, joka konvergoituu vakioarvoon, kun fissiolähdejakauma on konvergoitunut (Brown, 2006). Kuvassa 11 on näytetty Shannonin entropia ja k -ominaisarvo epäaktiivisten syklien funktiona tuoreella polttoaineella B taulukon 1 mukaisessa tilassa. Jokaisessa syklissä simuloitiin 100 000 neutronia. Kuvasta 11 havaitaan, että sekä fissiolähdejakauma että k -ominaisarvo ovat konvergoituneessa muodossa lähes välittömästi. Tämän perusteella laskenta tehtiin käyttämällä 20 epäaktiivista sykliä.

Aktiivisten syklien määräksi valittiin 500 ja jokaisessa sykliissä simuloitiin 100 000 neutronia. Kahdelle ensimmäiselle kumulatiiviselle palama-pisteelle annettiin arvot 0,1 ja 0,5 (palaman yksikkö on megawattipäivä per raskasmetallikilogramma), jonka jälkeen palama-askelta kasvatettiin 0,5:llä kumulatiiviseen palamapisteeseen 10 saakka. Tämän jälkeen palama-askeleeksi vaihdettiin 1,0 ja kumulatiivista palamaa kasvatettiin 60:een asti. Loviisan voimalaitoksen reaktoreista poistuvien palaneimpien polttoainepippujen keskipalama on tyypillisesti 50 ja 60 MWd/kgU välissä. Alun harvempaa palama-askelta käytettiin, jotta kiinteän polttoainepipun gadoliniumin palaminen saatiin laskettua tarkemmin. Samoja palama-askelia käytettiin kuitenkin myös palavaa absorbaattoria sisältämättömille polttoainelatkeille. Palamaratkaisijana käytettiin vaihtoehtoa, jossa predictor käyttää lineaarista ekstrapolaatiota ja corrector kvadraattista interpolaatiota. CASMO-ohjelmissa palama-askeleeksi asetettiin arvo 0,5 alun kovakoodattujen 0,1 ja 0,5 kumulatiivisten palama-pisteiden jälkeen. Tällä tavoin jokainen Serpent 2:n laskema palamapiste löytyy myös CASMO-ohjelmien laskemana, eikä sovitteita tarvitse muodostaa tuloksien vertailemiseksi.

Palamalasku tehtiin 30 asteen symmetriasektorissa, jossa jokaisen polttoainesauvan sisällä oleva polttoainealue käsiteltiin itsenäisenä palama-alueena. Lisäksi gadoliniumia sisältäville polttoaineille gadoliniumsauvan polttoainealue jaettiin kymmeneen pinta-alaltaan yhtä suureen renkaaseen tarkkuuden parantamiseksi. Kaikki materiaalilavuudet laskettiin käsin ja tilavuuksien tarkkuus varmistettiin käyttämällä Serpent 2:n ”checkvolumes”-ominaisuutta.



Kuva 11. Shannonin entropian ja k -ominaisarvon konvergoituminen epäaktiivisten syklien aikana. Vasen: polttoaineen B kiinteä nippu, oikea: polttoaineen B jatke.

5.2 Jälkikäsitellyn tuloksena syntyvien diffuusioparametrien vertailu

Vaikka CASMO-4E ja CASMO5 ovat eri ohjelmia ja ne käyttävät eri ydindatakirjastoja, on kuitenkin odotettavissa, että niiden avulla lasketuissa diffuusioparametreissa ei ole merkittävän suuria eroja. Tämä odotus perustuu siihen, että jos diffuusioparametrit poikkeaisivat merkittävästi, se heijastuisi merkittävänä eroina myös sydäntason laskujen tuloksissa, mitä voidaan pitää hyvin epätodennäköisenä. Tämä nimittäin tarkoittaisi, että CASMO5-ohjelman tuottamilla vakioilla reaktorin ennustettu käyttäytyminen poikkeaa merkittävästi CASMO-4E-ohjelman tuottamilla vakioilla ennustetusta käyttäytymisestä, joka on käyttökokemuksen perusteella riittävän lähellä todellista käyttäytymistä lataussuunnittelun ja reaktorivalvonnan kannalta. Näin ollen, jos merkittävää eroa olisi havaittavissa CASMO-ohjelmilla luoduissa diffuusioparametreissa, se suurella todennäköisyydellä merkitsisi, että MOD5-vakioiden laskentajärjestelmään ei ole tehty kaikkia tarpeellisia muokkauksia CASMO5-ohjelmaa varten. Polttoaineena vertailussa käytetään polttoainetta A. Diffuusioparametrien suoran vertailun lisäksi vertailu tehdään myös impliittisesti vertaamalla äärettömän hilan kasvutekijää kahdessa energiaryhmässä.

CASMO-ohjelmissa äärettömän hilan kasvutekijä kahdessa energiaryhmässä lasketaan yhtälöstä (Rhodes ja Edenius, 2004, 5-44) (Hykes et al., 2022b, 778):

$$k_{\infty} = \frac{\nu_{\Sigma_{f,1}} + \frac{\Sigma_{\text{rem}}}{\Sigma_{a,2}} \nu_{\Sigma_{f,2}}}{\Sigma_{a,1} + \Sigma_{\text{rem}}}, \quad (5.1)$$

missä käytetyt termit on määritelty yhtälölle (3.5).

Nipputasen diffuusioparametrit (ryhmävaikutusalat ym.) poimitaan suoraan cax-tiedoston lohkoista, eikä niitä muokata jälkikäsitelyssä. Sauvatasen diffuusioparametreille tilanne on toinen, sillä kuten luvussa 4.3 on kuvattu, CAXMAN-ohjelma muokkaa merkittävästi sauvatasen ryhmävaikutusaloja. Näin ollen niiden oikeellisuuden testaaminen CASMO5-ohjelmaa käytettäessä on erityisen tärkeää. Sauvatasen diffuusioparametrit lasketaan yhteensä 17:lle kuvassa 5 näkyvälle makroalueelle. Datan suuren määrän takia ei ole järkevää vertailla kaikkien sauvatasen makroalueiden diffuusioparametreja tai edes kasvutekijöitä tässä työssä. Sen sijaan esitetään ainoastaan äärettömän hilan kasvuteki-

jät edustaville makroalueille 1 (kulmakoppi), 2 (reunakoppi), 5 (sauvakoppi symmetria-akselilla, joka sisältää gadoliniumia kiinteillä polttoaineilla), 6 (normaali nipun sisäinen sauvakoppi) ja OUTF (nippujen välinen alue). Nippujen välinen alue eli homogenisoitu sisäinen vesirako, suojakotelo ja ulkoisen vesiraon puolikas eivät sisällä polttoainetta, joten luonnollisesti OUTF-alueen kasvutekijä on nolla. Kasvutekijän sijasta OUTF-alueen ryhmävaikutusalojen vertailuun käytetään tämän vuoksi neutronien migraatioalaa M^2 , joka määritellään CASMO5-ohjelmassa yhtälöllä (Hykes et al., 2022b, 778):

$$M^2 = \frac{D_1}{\Sigma_{\text{rem}} + \Sigma_{a,1}} + \frac{D_2}{\Sigma_{a,2}} \quad (5.2)$$

missä käytetyt termit on määritelty yhtälölle (3.5). Äärettömän hilan kasvutekijät on myös sauvatasolla laskettu yhtälöstä (5.1).

5.3 Tasapainolatausvertailu

Tässä luvussa esitellään vertailussa käytetty tasapainolataus ja tasapainolatauksen laskenta, kun MOD5-vakiot sydäntason laskuihin on laskettu käyttämällä CASMO-4E- ja CASMO5-ohjelmia.

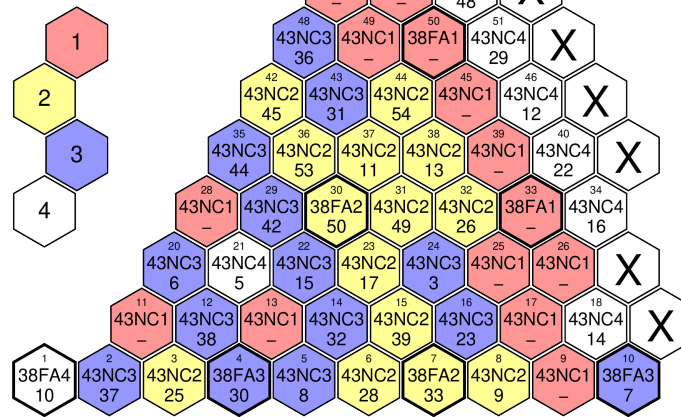
5.3.1 Vertailussa käytetty osittain vähävuotoinen 301 nipun tasapainolataus

Tasapainolataus on teoreettinen lataus, jossa jokaisessa vaihtolatauksessa tuoreet polttoaineniput tulevat aina samoille paikoille ja sydämessä jo olleet niput siirtyvät aina samoihin paikkoihin seuraavalle jaksolle tai poistuvat sydäimestä. Tässä työssä on CASMO-ohjelmien vertailua varten käytetty polttoaineelle B tehtyä tasapainolatausta, jonka latauskaavio on esitetty kuvassa 12.

Loviisa-1, 1500 MW

Tasapainolataus, 301 nippua
"HEXBU-3D/MOD5.3.0"

Nipun käyttövuosi



Elementtien latauskaavio



Tyypikoodi ja käyttövuosi

Paikka edellisessä latauksessa (-=tuore, +=sama)

Kuva 12. Polttoaineen B tasapainolatauksen latauskaavio. Suojaelementit on merkitty mustalla X:llä ja polttoainejatkeiden paikat on merkitty korostetuilla reunoilla.

Kuvan 12 lataus on 4-erälataus, joka on tehty sydämelle, jossa on 301 paikkaa polttoainenuipuille ja joka on osittain vähävuotoinen, koska 60 asteen sektorissa kahdessa reuna-apaikassa (26 ja 54) on tuoret niput, jotka aiheuttavat enemmän neutronivuotoa reaktorista suhteessa pidempään reaktorissa olleisiin nippuihin. Tasapainolatausta käytetään apuna helpottamaan oikeiden latausten suunnittelua: jos jakson pituus säilyisi samana latauksesta toiseen, pitkän ajan kuluttua oikea lataus muistuttaisi tasapainolatausta. Oikeat lataukset eivät kuitenkaan täysin vastaa tasapainolatausta, koska jaksosten pituudet vaihtelevat hieman jaksosta toiseen. Tasapainolataus suunnitellaan sydämen 60 asteen symmetriasektorissa ja polttoainenuippujen siirrot pyritään tekemään pareina siten, että siirrot ovat toistensa peilikuvia 30 asteen symmetria-akselin suhteen. Ihannetilanteessa jokainen siirto pysyy 30 asteen symmetriasektorin sisällä ja symmetria-akselilta aloittava nippu pysyy symmetria-akselilla. Toisin sanottuna yksikään siirto ei ylitä 30 asteen symmetria-akselia. Tämä johtaa siihen, että koko sydämessä vallitsee 30 asteen rotaatiosymmetria nippu- ja sauvapalamajakaumissa. Näin ollen, koska polttoainenuippujen reaktorifysikaaliset ominaisuudet sekä nippu- että sauvatasolla määräytyvät palaman funktiona, kaikki sydämen ominaisuudet voitaisiin teoriassa päätellä 30 asteen sektorista. Käytännössä kui-

tenkin tasapainolatauksen reaktorifysikaalisten ominaisuuksien laskenta tehdään aina 60 asteen sektorissa. Lisäksi on syytä huomioida, että todellinen sydän ei koskaan ole ominaisuuksiltaan täysin symmetrinen, koska esimerkiksi jäädytteen tulolämpötilajakauma sydämessä on epätasainen. Tämä aiheuttaa sydämeen sektorikallistumia sovitetuissa tehojakaumissa (Kuopanportti, 2022c, 17) ja siten myös palamajakaumissa.

Vaikka edellä kuvattu 30 asteen rotaatiosymmetrisyys on pyrkimys tasapainolatauksen suunnittelussa, se ei ole ehdoton vaatimus. Lievät symmetriarikkoihin johtavat siirrot ovat sallittuja, jos niillä saadaan tuotettua paremmat termiset nousuvarat tai korkeampi lopputeho verrattuna lataukseen, jossa vallitsee 30 asteen rotaatiosymmetria. Esimerkiksi kuvan 12 latauksessa tehtävät siirrot johtavat (lieviin) symmetriarikkoihin. Jotta tasapainolatausta voidaan pitää hyväksyttävänä, HEXBU- ja ELSI-ohjelmia käyttämällä selvitetään:

- pienin entalpianousuvara jakson aikana
- pienin lineaaritehovara jakson aikana
- täyden tehotilan suurin suhteellinen nipputeho eli radiaalimuotokerroin (suurimman nipputehon suhde keskimääräiseen nipputehoon)
- nipun suurin keskipalama jakson lopussa
- sammutusmarginaalit täydellä boorauksella ilman säätösauvoja useassa eri lämpötilassa
- sammutusmarginaali isotermisessä 174 °C lämpötilassa, kun sammutus on tehty ilman reaktiivisinta säätösauvaa⁸
- reaktiivisuuden jäädytelämpötilakertoimen merkki kaikissa kriittisissä tiloissa.

Kaikkien selvitettyjen suureiden on oltava sallittujen rajojen sisällä vallitsevilla lisäehdoilla. Tehonsäätöön osallistuvan säätösauvaryhmän jatkeet eivät saa olla tuoreita, yksikään polttoainenippu ei saa olla sydämessä pidempään kuin neljä käyttöjaksoa, jakson lopputeho on taloudellisesti optimaalinen ja neutronivuoto reaktorista on mahdollisimman pieni. Lisäksi laskennassa selvitetään suuri joukko muita parametreja, joita käsitellään tarkemmin luvussa 6.3.

⁸Lämpötila 174 °C perustuu höyryputken rikkoutumisonnettomuuden turvallisuusanalyysien tuloksiin.

Tasapainolatauksessa käytettyjen polttoaineniippujen siirtojen etsiminen on hyvin vaikea matemaattinen ongelma, sillä polttoaineniiput voidaan asettaa 60 asteen sektoriin valtaavan monella erilaisella tavalla. Siirtojen etsinnän lisäksi optimaalisen latauksen löytämistä monimutkaistaa se, että esimerkiksi uuden polttoainetyypin käyttöönotossa potentiaalisia väkevöinti-profilointeja on tarjolla suuri määrä, joista vain tietty kombinaatio valitaan sydämeen. Ongelma ei siis välttämättä ole ainoastaan löytää riittävät termiset marginaalit toteuttava mahdollisimman taloudellinen polttoaineniippujen siirtosuunnitelma, vaan siirtosuunnitelma on myös tehtävä optimaaliselle kombinaatiolle väkevöinti-profilointeja. Lisäksi latauksen termiset nousuvarat ovat yleensä melko lähellä sallittuja rajoja, jolloin ne ylittyvät herkästi pienilläkin muutoksilla polttoaineniippujen siirtoihin. Latauksen etsiminen ilman aputyökaluja on näin ollen erittäin vaikea ja aikaa vievä tehtävä. Loviisan voimalaitoksen lataussuunnittelussa käytetään latauksen etsinnässä aputyökaluna ALPOT-ohjelmaa (Kuopanportti, 2012), jota on käytetty myös kuvan 12 tasapainolatauksen etsinnässä. Tasapainolatauksen haussa ALPOT-ohjelma etsii annettujen lähtötietojen perusteella alustavan lähes valmiin latauksen käyttäen latausta parantavien siirtojen hakemiseen symmetrian säilyttävää binäärihakua. Löydettyä latausta voidaan viimeistellä käsin esimerkiksi symmetrian parantamiseksi.

5.3.2 Tasapainolatauksen reaktorifysikaalisten ominaisuuksien laskenta

Tasapainolatauksen reaktorifysikaalisten ominaisuuksien laskenta alkaa iteroimalla palamajakaumat HEXBU-3D- ja ELSI-1440-ohjelmissa sekä niippujen noodit- että sauvatasolla, sillä toistuvaa saflauskaaviota vastaavia palamajakaumia ei tiedetä etukäteen. Palamajakauman iteroinnissa HEXBU-3D päivittää noodipalamia jokaisen ulkoiteraation aikana ja säätää jakson pituutta siten, että sydän säilyy kriittisenä syötetiedostossa asetetussa jakson loppua kuvaavassa tilassa (terminen teho, boorikonsentraatio, jäähdytteen tulolämpötila ja niippujen sisäinen jäähdytteen massavirtaus) (Kaloinen, 1992, 14). Kun ensimmäinen arvio palamajakaumista on saatu, simuloidaan yhdeksän samanpituista jaksoa, joiden aikana palamajakaumat konvergoituvat tasapainotilaan, joka on edustettuna tasapainolatauksessa. Tämän jälkeen simuloidaan vielä yksi jakso, josta kerätään tasapainolatauksen (puhtaasti teoreettiset) reaktorifysikaaliset ominaisuudet halutuissa palama-

pisteissä. Simuloinnista saatu tulosdata kerätään niin sanottuun tietokantatiedostoon, josta jälkikäsitteilyohjelmat parsivat tarpeellisen datan sekä piirtävät ja muodostavat oleelliset kuvaajat ja taulukot. Sekä CASMO-4E- että CASMO5-vakioilla tehdyssä laskennassa on käytetty täsmälleen samoja palamapisteitä ja jokaisessa palamapisteessä jäähdytteen massavirtaukset sekä jäähdytteen tulolämpötilat ovat samat CASMO-vakioiden välillä. Ainoa ero HEXBU-ELSI-ohjelmien syötetiedostoissa eri CASMO-ohjelmilla on niissä käytetyt MOD5-vakiot ja käytetty reaktiivisuuskorjaus, joka kuvataan jäljempänä.

Jakson edetessä kriittinen boorikonsentraatio pienenee tasaisesti kompensoiden polttoaineen palamisen seurauksena hävinnyttä reaktiivisuutta. Jakso simuloidaan täydellä teholla ainoastaan kriittiseen boorikonsentraatioon 10 ppm asti, jonka jälkeen simuloidaan venytysajo (Kuopanportti, 2022c, 5). Todellisen jakson lopussa tehtävässä venytysajossa jäähdytteen tulolämpötila ja reaktorin teho laskevat tasaisesti, minkä seurauksena syntyvän lisäreaktiivisuuden ansiosta sydän säilyy kriittisessä tilassa, kunnes optimaalinen lopputeho on saavutettu. Esimerkiksi tässä työssä käytetyssä tasapainolatauksessa lopputeho on 93,5 % ja venytysajalla tuotettu energia 19 täystehopäivää. Lopputeho on tavoitteellisesti 88–98 % nimellistehosta (Kuopanportti, 2022c, 11) ja taloudellisesti optimaalinen arvo riippuu polttoaineen ja sähkön hinnasta (Kuopanportti, 2017, 2). Simuloinnissa venytysajo mallinnetaan pudottamalla ensin jäähdytteen lämpötilaa ja sitten reaktorin tehoa (todellisuudessa tehon- ja jäähdytteen tulolämpötilan putoaminen tapahtuvat siis samaan aikaan). Lisäksi venytysajon simuloinnissa otetaan huomioon venytysajossa tapahtuva massavirtauksen kasvu, sillä jäähdytteen tulolämpötilan pieneneminen kasvattaa jäähdytteen tiheyttä.

Molemmat HEXBU-3D- ja ELSI-1440-ohjelmat tarvitsevat toimiakseen kaksi syötetiedostoa, jotka on kuvattu ohjelmien manuaaleissa (Rintala, 2016) ja (Kuusisto, 2007). Kummankin ohjelman tiedostot koostuvat ohjelmien toimintaa ohjaavista korteista. Karkeasti kuvattuna toinen tiedosto koostuu sydämen (HEXBU-3D) tai polttoainepipun (ELSI-1440) määrittämiseen käytetyistä korteista ja toinen tiedosto luvussa 4.1 kuvatuista MOD5-vakiot sisältävistä korteista sekä albedot ja veden termodynaamiset ominaisuudet sisältävistä korteista. Toisin kuin reaktorin suoritusarvolaskennassa käytetyssä RESU-98-ohjelmassa, tasapainolatauksen laskennassa käytetyssä HEXBU-3D-ohjelmassa on käytössä laaja-alaiset osittaisalbedot, joita on kuvattu luvussa 3.2.3. RESU-98-ohjelmassa käy-

tään ainoastaan perinteisiä ei-laaja-alaisia kokonaisalbedoja. HEXBU-3D-ohjelman syöteen avulla sydämen kokonaisreaktiivisuutta voidaan säätää keinotekoisella tasokorjauksella. Reaktiivisuuden tasokorjausta muuttamalla tasapainolatauksen kriittinen boorikonentraatio säädetään siten, että venytysajon alkaessa sen arvo on vaadittu noin 10 ppm. Taulukossa 12 on esitetty käytetyt tasokorjaukset sekä polttoaineelle A että polttoaineelle B, kun MOD5-vakiot on laskettu CASMO-4E ja CASMO5-ohjelmia käyttämällä. Esimerkiksi CASMO-4E-ohjelman avulla lasketuilla MOD5-vakioilla reaktorin reaktiivisuus on 360 pcm liian pieni ilman korjausta tässä työssä käytetyssä tasapainolatauksessa. On syytä huomauttaa, että reaktiivisuuden tasokorjauksen tarve ei suoraan kerro mitään MOD5-vakioiden ”hyvyydestä”, vaikka CASMO5-ohjelmaa käyttämällä tasokorjaukset ovat pienemmät kuin CASMO-4E-ohjelmaa käyttämällä. Toisenlaisilla polttoaineilla tilanne voisi olla päinvastainen. Lisäksi Loviisan laskentajärjestelmässä on tunnettuja yksinkertaisuuksia ja esimerkiksi luvussa 3.2.3 käsitelty mallinnusvirhe vaikuttavat reaktiivisuuden laskentaan.

Taulukko 12. Polttoaineille käytetyt reaktiivisuuden tasokorjaukset, kun MOD5-vakiot on laskettu eri CASMO-ohjelmia käyttämällä.

MOD5-vakioiden laskennassa käytetty ohjelma	Reaktiivisuuden tasokorjaus	Polttoaine
CASMO-4E	+360 pcm	A
CASMO5	+20 pcm	A
CASMO-4E	+360 pcm	B
CASMO5	+40 pcm	B

5.4 Laskettujen tuloksien vertailu mitattuihin tuloksiin

Tässä luvussa kuvataan kompaktisti laskennan kulku RESU-98-ohjelman offline-versiolla sekä suureet, joita käytetään vertailussa mittauksiin. Vertailtavina suureina on suhteellinen nipputeho, joka kuvaa nipputehon ja sydämen keskimääräisen nipputehon suhdetta sekä jakson aikainen kriittinen boorikonentraatio. Vertailu tehdään Loviisa-1-reaktorin vuosina 2019–2020 tapahtuneelta 43. jaksolta. Laskennassa käytetty polttoaine on luvus-

sa 2 kuvattua polttoainetta A, joka on tällä hetkellä käytössä Loviisan voimalaitoksella.

5.4.1 Laskenta RESU-98-ohjelman offline-versiolla

Pääidea RESU-98-ohjelman offline-version käytössä on hyödyntää todellisista jaksoista kerättyä mittaustietoa jo toteutuneiden jaksoiden uudelleensimulointiin. Tämä mahdollistaa sen, että RESU-98-ohjelmaan tehtävien muutoksien vaikutusta voidaan tutkia ikään kuin muutokset oltaisiin tehty reaktorivalvonnassa käytettyyn RESU-98-ohjelman online-versioon. Tässä työssä RESU-98-ohjelmaan tehty muutos on sen käyttämissä MOD5-vakioissa, jotka on luotu ensimmäistä kertaa CASMO5-ohjelmaa käyttämällä.

Kuten luvussa 3.4 on kuvattu, RESU-98 yhdistää reaktorin teoreettisen tehojakauman lämpötila- ja neutronivuomittauksien perusteella laskettuun tehojakaumaan, millä saadaan mahdollisimman hyvä arvio reaktorin todellisesta tehojakaumasta. Termohydrauliset suureet sekä nippu- ja sauvakohtaiset palamat lasketaan sovitettuna tehojakauman avulla. Kaikki RESU-98-ohjelman tekemä laskenta tehdään täyden sydämen laskuina sekä offline- että online-versioissa. Näin ollen laskenta poikkeaa luvun 5.3 tasapainolatauksen suhteen, missä pelkästään HEXBU-ELSI-ohjelmia käyttämällä laskenta on tehty 60 asteen symmetriasektorissa. Online-version vuosovituksessa käytetyt jäähdytteen lähtölämpötila- ja neutronivuomittauksien viikkokeskiarvot tallennetaan niin sanottuun mittaustietonauhaan (kutsutaan myös RML-nauhaksi). Kyseisen mittaustietonauhan dataa hyödynnetään offline-version vuosovitusten tekemisessä sekä mitattujen nipputehojen määrittämisessä. RESU-98:n laskennassa käytetään tietokantatiedostoa, johon tallennetaan esimerkiksi jakson lopun nippu- ja sauvatason palamajakaumat, joita käytetään seuraavan jakson alun simuloinnissa. Tieto palamajakaumista on tärkeää, koska HEXBU-ELSI-ohjelmien käyttämät MOD5-vakioiden diffuusioparametrit määräytyvät palamien perusteella. Tässä työssä esitetyissä tuloksissa RESU-98:n offline-version vuo- ja lämpötilasovitus ei kuitenkaan ole tehty, jotta saataisiin parempi kuva teoreettisten ja mitattujen tulosten eroista.

Ennen kuin lasketut ja mitatut nipputehot ja boorikonsentraatiot kerättiin jaksolta 43, RESU-98-ohjelman offline-versiolla laskettiin myös jaksot 40, 41 ja 42. Jakson 40 alun

palamajakaumat nippujen noodi- ja sauvatasolla otettiin jakson 39 todellisesta tuotantotietokannasta. Laskenta tehtiin vertailua varten sekä CASMO-4E- että CASMO5-ohjelmilla lasketuilla MOD5-vakioilla. Vertailu on tehty ainoastaan viimeiseksi simuloidulta jaksolta 43, sillä siinä kaikki käytetyt niput on säteilytetty käyttäen pelkästään CASMO5-laskentaan perustuvia MOD5-vakioita. Näin ollen jaksoa 43 voidaan pitää kaikista edustavimpana vertailun kannalta.

5.4.2 Nipputehojen mittaaminen

Reaktorisydämen nipputehojen mittaukset perustuvat jäähdytteen lämpötilamittauksiin, joiden avulla määritetään nipun sisään virtaavaan jäähdytteen tulo- ja lähtöentalpiat soviteiden avulla. Mittaukset tehdään ainoastaan kiinteistä polttoainenipuista. Seuraava kuvaus perustuu viitteeseen (Kuopanportti, 2015, 3). Entalpiat lasketaan jäähdytelämpötiloista laskemalla ensin nipuille kerroin F_n sovitteesta:

$$F_n = 0,10295 T_n^3 - 0,015609 T_n^2 + 0,65041 T_n + 0,14295, \quad (5.3)$$

missä T_n on jäähdytteen lämpötilasta T_{coo} riippuva parametri, joka määritellään yhtälöllä:

$$T_n = \frac{T_{\text{coo}} - 250}{80}. \quad (5.4)$$

Lämpötilan yksikkö on celsiusaste. Kun kerroin F_n tunnetaan, entalpia H yksikössä kJ/kg lasketaan jäähdytelämpötilan funktiona yhtälöstä:

$$H(T_{\text{coo}}) = 600 F_n(T_{\text{coo}}) + 1000. \quad (5.5)$$

Nipuista lähtevän jäähdytteen lämpötila mitataan nippujen yläpuolella sijaitsevilla termopareilla ja nippuihin tulevan jäähdytteen lämpötila kiertopiirien kylmähaarojen lämpötilamittausten massavirtauksilla painotettuna keskiarvona. Jäähdytteen tulolämpötilajakautuma oletetaan siis yksinkertaistaen tasaiseksi. Sydämen sisällä virtaavaan jäähdytteen net-

tomassavirtaus G_{tot} saadaan poistamalla sydämen läpi virtaavasta bruttovirtauksesta teoreettisen ohivirtauksen osuus, joka sisältää esimerkiksi suojakoteloiden ulkopuolisen ja suojaelementtien läpi virtaavan massavirtauksen osuuden. RESU-98-laskennassa on käytetty polttoaineelle A ohivirtauksen osuutta 9,5 % kaikilla simuloituilla jaksoilla. Merkkamalla yksittäisen nipun läpi virtaavan jäähdytteen suhdetta koko sydämen läpi virtaavaan nettomassavirtaukseen λ , yksittäisen nipun mittauksiin perustuva nipputeho p_n saadaan yhtälöstä:

$$p_n = \lambda G_{\text{tot}} \frac{H(T_{\text{coo, lähtö}}) - H(T_{\text{coo, tulo}})}{\Gamma}, \quad (5.6)$$

missä Γ on luvussa 3.4.1 mainittu termoparintulkintakerroin, jolla otetaan huomioon jäähdytteen epätäydellinen sekoittuminen nipun yläpäässä. Mitatut nipputehot on tässä työssä laskettu 30 asteen symmetriasektoreista mitattujen nipputehojen keskiarvoina, jotta tulolämpötila- ja virtausjakauman epätarkkuudesta johtuvaa mittausvirhettä saadaan vähennettyä (Kuopanportti, 2015, 3).

Teoreettisesti laskettujen nipputehojen vertailua varten mitatut nipputehot skaalataan teoreettisten ja mitattujen nipputehojen keskiarvojen suhteella, jolloin kummankin tapauksen niput tuottavat saman kokonaistehon reaktoriin (1500 MW). Tällä menetelmällä eliminoidaan mitattuihin nipputehoihin tasovirhettä aiheuttavat epävarmuuskomponentit: reaktorin nettovirtaus ja lämpöteho sekä jäähdytteen tulolämpötilojen keskiarvoistaminen (Kuopanportti, 2015, 5). Skaalauskerroimen (jota kutsutaan myös korjauskertoimeksi) koko luokka on tässä työssä esitetyissä tuloksissa noin yksi prosentti. Lopullinen korjauksen jälkeinen mitattujen nipputehojen epävarmuus on noin 3 % (Kuopanportti, 2015, 5).

5.4.3 Kriittisen boorikonsentraation mittaaminen

Tavallisesti jakson aikana reaktorin säätösauvat ovat kokonaan ulkona sydäimestä ja kriittisyyttä hallitaan muuttamalla jäähdytteeseen ja moderaattoriin sekoitetun boorihapon B(OH)_3 konsentraatiota. Boorikonsentraation säädöllä kompensoidaan reaktiivisuusmuutokset, jotka johtuvat polttoaineen palamasta, sydämen ksenonmyrkytyksestä, primääri-

piirin lämpötilan säädöstä sekä reaktorin tehotason hitaista muutoksista (Vehmaanperä, 2020, 7). Konsentraatiosta puhuttaessa tarkoitetaan joko boorihapon konsentraatiota, jolloin konsentraation yksikkö on g/kg tai vaihtoehtoisesti boorin konsentraatiota, jolloin konsentraation yksikkö on ppm. Boorihapon konsentraatiomääritelmässä g on boorihapon massan yksikkö, kg liuoksen (vesi ja boorihappo) massan yksikkö ja boorin konsentraation määritelmässä ppm on boorimassan suhde liuoksen massan suhteeseen miljoonasosina. Loviisan voimalaitoksella käytetty vastaavuus yksiköiden välillä on, että 1 g/kg vastaa 175 ppm eli boorihapon massasta oletetaan 17,5 % olevan booria. Tyypillisesti jakson alussa boorihapon konsentraatio on n. 6 – 7 g/kg.

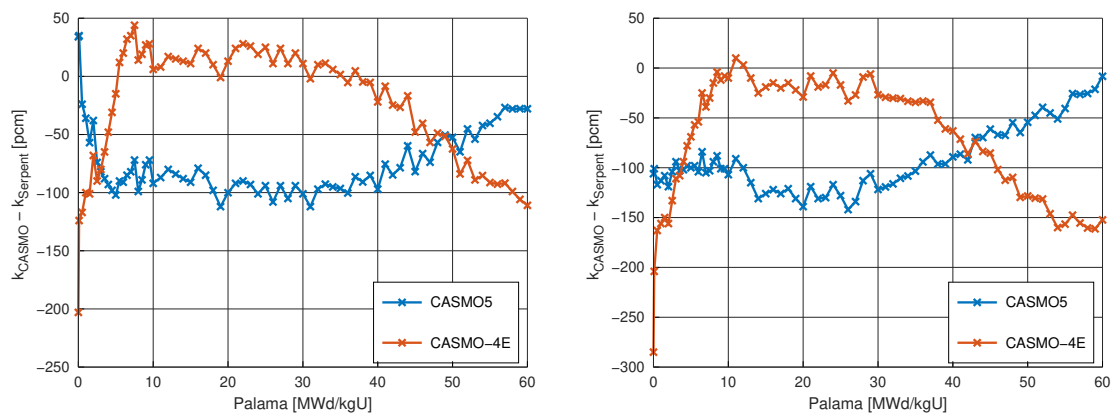
Kriittinen boorikonsentraatio mitataan laboratoriossa siten, että jakson aikaiset kriittiset boorikonsentraatiot ovat saatavilla päivän tarkkuudella. Tässä työssä mitattu boorikonsentraatio on vertailua kerätty jaksolta 43 aikaväliltä 7.10.2019 – 13.7.2020, jolloin reaktori on pääsääntöisesti toiminut nimellisellä 1500 MW lämpöteholla. Yksinkertaisuuden vuoksi jakson lopussa tehtävää venytysjaksoa ei ole huomioitu vertailussa.

6 Tulokset

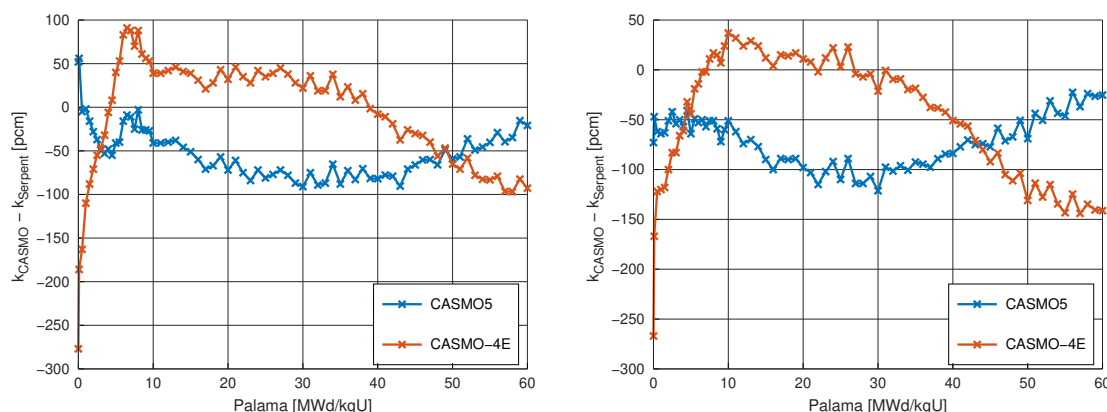
Tässä luvussa on esitetty käytettyjen validointimenetelmien tulokset. CASMO5:n avulla saatujen tulosten referenssinä on käytetty vastaavia CASMO-4E:n avulla saatuja tuloksia lukuun ottamatta lukua 6.1, jossa referenssinä ovat Serpent 2:n laskemat tulokset.

6.1 CASMO–Serpent-vertailutulokset

Verrattavia laskentatuloksia CASMO-ohjelmien ja Serpent 2:n välillä ovat äärettömän hilan kasvutekijä sekä fissiilien nuklidien Pu-239, U-235, neutronimyrkkynuklidien Xe-135, Sm-149 sekä palavien absorbaattorinuklidien Gd-155 ja Gd-157 atomitiheydet palaman funktiona. Erot kasvutekijöissä on esitetty kuvissa 13 ja 14. Erot fissiilien nuklidien ja neutronimyrkkyjen keskimääräisissä atomitiheyksissä palaman funktiona on esitetty liitteessä 1.



Kuva 13. Äärettömän hilan kasvutekijäerot CASMO-ohjelmien ja Serpent 2:n välillä polttoaineella A. Vasen: kiinteä, oikea: jatke.



Kuva 14. Äärettömän hilan kasvutekijäerot CASMO-ohjelmien ja Serpent 2:n välillä polttoaineella B. Vasen: kiinteä, oikea: jatke.

CASMO5:n suhteen kuvista 13 ja 14 voidaan havaita, että 1) kiinteiden polttoainenuklien ensimmäisiä palamapisteitä lukuun ottamatta CASMO5 aliarvioi reaktiivisuuden palamajakson aikana, 2) erokäyrän muoto muistuttaa ylöspäin aukeavaa paraabelia, missä ero ohjelmien välillä on pienimmillään palamajakson alussa ja lopussa sekä 3) eri polttoainetyypeillä jakson alun reaktiivisuuden tasoerot ovat erilaiset. Määrä, jolla CASMO5 maksimissaan aliarvioi reaktiivisuuden, on polttoaineella A noin 150 pcm ja 125 pcm polttoaineella B. Kummallekin polttoaineelle suurin ero tapahtuu jatkeilla.

CASMO5:n reaktiivisuuden aliarviointi on odotettavissa liitteen 1 atomitiheysvertailujen perusteella. Kuvien 24 – 27 U-235-atomitiheysvertailujen ja kuvien 28 – 31 Pu-239-atomitiheysvertailujen perusteella CASMO5 aliarvioi kyseisten polttoainenuklidien atomitiheydet koko palamajakson aikana. Lisäksi CASMO5 toisaalta yliarvioi neutronimyrkkyyden Xe-135- ja Sm-149-atomitiheydet kuvien 32 – 35 ja 36 – 39 perusteella. Erot atomitiheyksissä eivät voi kuitenkaan täysin selittää eroa ohjelmien välillä, sillä ero on selvästi nähtävissä myös pienillä palamilla, joissa materiaalien nukliditiheydet ovat lähellä toisiinsa. Nukliditiheuserot voivat kuitenkin selittää erokäyrän muuttumisen ylöspäin aukeavan paraabelin mukaiseen muotoon.

Kuvista 24 – 27 voidaan havaita, että suurin ero CASMO5:n ja Serpent 2:n välillä U-235-atomitiheydessä tapahtuu lähellä palamapistettä 40 MWd/kgU, jonka jälkeen absoluuttinen ero U-235-atomitiheydessä alkaa pienenemään. Ennen mainittua palamapistettä ab-

soluuttinen ero U-235-atomitiheydessä on jatkuvasti kasvanut ja CASMO5 laskee koko tarkasteluvälillä pienemmän U-235-atomitiheyden Serpent 2:een verrattuna. CASMO5 laskee myös Pu-239:lle pienemmän atomitiheyden kuin Serpent 2 koko tarkasteluvälillä, mutta absoluuttinen ero pienenee tarkastelujakson loppua kohti kuten voidaan havaita kuvista 28 – 31. Palaman kasvaessa U-235:n merkitys pienenee ja Pu-239:n merkitys kasvaa. Näin ollen tulos, jossa jossain vaiheessa tarkasteluväliä absoluuttinen kasvutekijäero saavuttaa maksimin ja alkaa sen jälkeen pienenemään, on uskottava. Absoluuttisen eron kaventuminen on uskottava myös, kun otetaan huomioon merkittävimmät neutronimyrkyt Xe-135 ja Sm-149. Kuvien 32 – 35 ja 36 – 39 perusteella Xe-135- ja Sm-149-nuklidien atomitiheydet kasvavat CASMO5:n laskemana suhteellisesti enemmän, mutta koska Xe-135:n ja Sm-149:n merkitys pienenee kohti tarkastelujakson loppua, neutronimyrkkyjen absoluuttisen eron kasvu ei riitä kompensoimaan Pu-239:n atomitiheyden absoluuttisen eron kaventumista ohjelmien välillä.

Kiinteillä polttoainenuipilla ja pienillä palamilla CASMO5 laskee suuremman kasvutekijän kuin Serpent 2, mikä oletettavasti johtuu kiinteissä nipuissa olevasta gadoliniumista. Liitteen 1 kuvista 40 ja 41 voidaan nähdä, että CASMO5:n laskemat Gd-155- ja Gd-157-atomitiheydet ovat suuremmat kuin Serpent 2:n vastaavat palamavälillä 0 – 4 MWd/kgU. CASMO5:n laskema kasvutekijä on suurempi suuremmalla gadoliniumin nukliditiheydellä, josta voidaan päätellä, että gadolinium vaikuttaa reaktiivisuuteen vähemmän CASMO5:ssä kuin Serpent 2:ssa. Kuvassa 14 selvästi havaittava ”pomppu” palamien 4 ja 10 MWd/kgU välissä kiinteälle nipulle voidaan selittää Gd-155:n ja Gd-157:n epätasaisella palamisella. Kuten kuvista 40 ja 41 voidaan huomata, noin palaman 4 MWd/kgU jälkeen CASMO5:n laskema Gd-157-atomitiheys muuttuu nopeasti pienemmäksi kuin Serpent 2:n laskema Gd-157-atomitiheys. Lisäksi tällöin Gd-157-nuklideja on vielä jäljellä merkittävä määrä. Tällöin on odotettavissa, että CASMO5:n kasvutekijä kasvaa nopeasti enemmän kuin Serpent 2:n kasvutekijä, mikä selittää havaitun pomppun suhteellisessa kasvutekijäerossa. Gd-155-nuklidin suhteen palaminen on tasaisempaa ohjelmien välillä kuin Gd-157:n suhteen, eikä toista pomppua pääse syntymään.

Suurin kasvutekijäero CASMO5:n ja Serpent 2:n välillä on polttoaineella A noin -150 pcm ja polttoaineella B noin -125 pcm. Tarkastelujakson alussa absoluuttinen kasvutekijäero on noin 50 pcm suurempi polttoaineella A kuin polttoaineella B. Polttoainei-

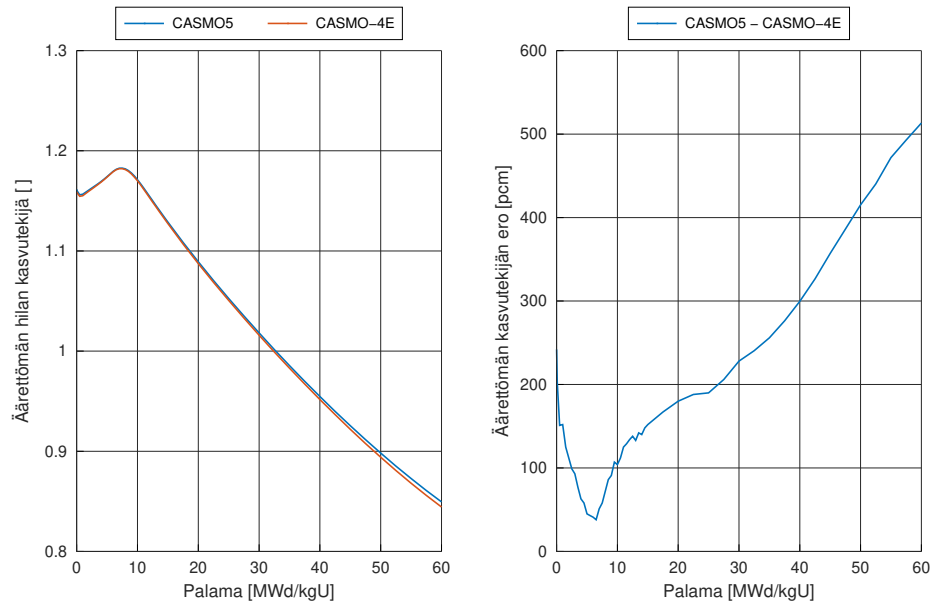
den geometrisissa mitoissa, väkevöintiasteissa ja materiaalikompositioissa on eroja, jotka luultavasti vaikuttavat jakson alun reaktiivisuuseroon. Tarkkaa syytä on kuitenkin vaikea paikallistaa. Yleisesti ottaen CASMO5:n laskemia tuloksia voidaan kuitenkin pitää hyvinä, sillä jonkinlainen poikkeama kasvutekijöissä on odotettavissa ohjelmien välillä. Eriyisesti systemaattista eroa laskettuihin kasvutekijöihin aiheuttavat ohjelmien käyttämät vaikutuslakirjastot. Kuten luvussa 3.1 mainittiin, CASMO5:n vaikutuslakirjasto hyödyntää TENDL-2012-kirjaston dataa. Tästä seuraa, että CASMO5:n transportratkaisussa on mukana useita ainoastaan TENDL-2012-kirjastosta löytyviä nuklideja, joita ei löydy ENDF/B-VII.1:n dataan perustuvasta vaikutuslakirjastosta, jota Serpent 2 käytti laskennassa. Polttoaineen A jatkeella tehdyn testauksen perusteella noin 60:n TENDL-2012-kirjastosta löytyvän nuklidin data puuttuu Serpent 2:n käyttämästä vaikutuslakirjastosta, kun huomioidaan ainoastaan nuklidit, joiden atomitiheys on suurempi kuin $1^{-10} \text{ 1/m}^2\text{b}$ (nuklideja on paljon enemmän, jos pienemmät pitoisuudet huomioidaan). Vaikka useiden TENDL-2012-kirjastosta löytyvien nuklidien atomitiheys on palamalaskussa pieni⁹, valtaosa niistä on kuitenkin $1/v$ -absorbaattoreita, joten niillä on näin ollen oletettavasti myös reaktiivisuusvaikutus, joka vaikuttaa kasvutekijäeroon ohjelmien välillä.

Vertailussa on myös mahdollisesti tapahtunut virheiden kompensoitumisesta aiheutuvaa kasvutekijävastaavuuden parantumista, jossa esimerkiksi eron kasvu laskettujen nuklidien atomitiheyksissä parantaa kasvutekijöiden vastaavuutta ohjelmien välillä. Tämän havainnollistamiseksi kuviin 13 ja 14 on lisätty myös erot CASMO-4E:n ja Serpent 2:n välillä. Kuten kuvista nähdään, ohjelmien laskemat kasvutekijät vastaavat erittäin hyvin toisiaan palamavälillä 10 – 30 MWd/kgU, vaikka liitteen 1 kuvien 42 ja 43 perusteella reaktiivisuuden kannalta tärkeiden nuklidien U-235 ja Pu-239 atomitiheyksissä ohjelmien välillä on tällöin huomattava ero. Yhdenmukaisemman vertailun tekeminen vaatisi TENDL-2012-dataa Serpent 2:lle, jolloin CASMO5:n mcp-tiedostoista voitaisiin kerätä materiaalien atomitiheydet Serpent 2:lle jokaisessa halutussa palamapisteessä. Tällöin kasvutekijöitä voitaisiin vertailla jokaisessa palamapisteessä ilman vaikutuslakirjastoista ja nuklidien palamasta sekä fissiotuotosta syntyvää virhettä. Näin voitaisiin siis eliminoida palamalaskennasta aiheutuva virhe ja tutkia pelkästään transport-ongelman ratkaisusta syntyviä eroja. Tätä ei tehty, koska TENDL-2012-dataa ei ollut saatavilla Serpent 2:lle.

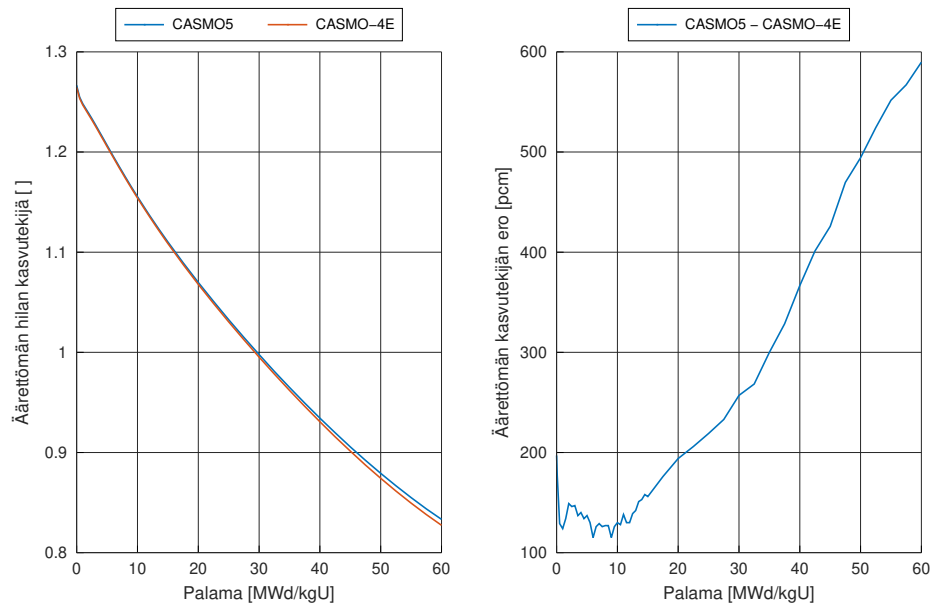
⁹Jos ainoastaan nuklidit, joiden atomitiheys on suurempi kuin $1^{-7} \text{ 1/m}^2\text{b}$ huomioitiin, Serpent 2 pystyi toteuttamaan laskennan käyttämällä CASMO5:n nuklidien atomitiheyksiä.

6.2 Jälkikäsitellyn tuloksena syntyvien diffuusioparametrien vertailutulokset

Kuvissa 15 ja 16 on esitetty yhtälön (5.1) avulla lasketut äärettömän hilan kasvutekijät polttoaineen A kiinteälle nipulle ja jatkeelle, kun diffuusioparametrit on laskettu CASMO-4E- ja CASMO5-ohjelmilla. Kuvien perusteella CASMO5-ohjelman avulla lasketut ryhmävaikutusalat tuottavat nipuille suuremman reaktiivisuuden kuin CASMO-4E-ohjelman avulla lasketut ryhmävaikutusalat. Suurin kasvutekijäero on suurilla palamilla sekä kiinteälle nipulle että jatkeelle ollen 500 ja 600 pcm:n välissä. Kasvutekijöiden laskennassa käytettyjen ryhmävaikutusalojen erot on esitetty polttoaineen A kiinteälle nipulle liitteen 2 kuvissa 44 – 48. Kuvista havaitaan, että ryhmävaikutusalojen trendi palaman funktiona käyttäytyy samankaltaisesti. Kaikissa muissa kuin termisen ryhmän fissiotuottovaikutusaloissa ero ryhmävaikutusaloissa on suurimmillaan noin prosentin luokkaa. Termisen ryhmän fissiotuottovaikutusalalle ero kasvaa palaman funktiona ja on enimmillään noin kolme prosenttia. Eroa voi osittain selittää fissiilien nuklidien erilainen palamanopeus CASMO-ohjelmissa: liitteen 2 kuvan 49 perusteella CASMO5-ohjelmaa käyttämällä fissioissa vapautuu keskiarvoisesti noin prosentin verran enemmän energiaa kuin CASMO-4E-ohjelmaa käyttämällä. Tällöin on odotettavissa, että CASMO5-ohjelmalla fissiilien nuklidien määrä vähenee hitaammin, mikä näkyy termisen ryhmän fissiotuottovaikutusalan suurempana kokona palaman kasvaessa. Termisen ryhmän fissiotuottovaikutusalan eron kasvu palaman funktiona selittää myös kasvutekijän eroa CASMO-ohjelmien välillä.



Kuva 15. Polttoaineen A kiinteän nipun äärettömän kasvutekijän erot, kun ryhmävaikutusalat on laskettu CASMO-ohjelmilla.



Kuva 16. Polttoaineen A jatkien äärettömän kasvutekijän erot, kun ryhmävaikutusalat on laskettu CASMO-ohjelmilla.

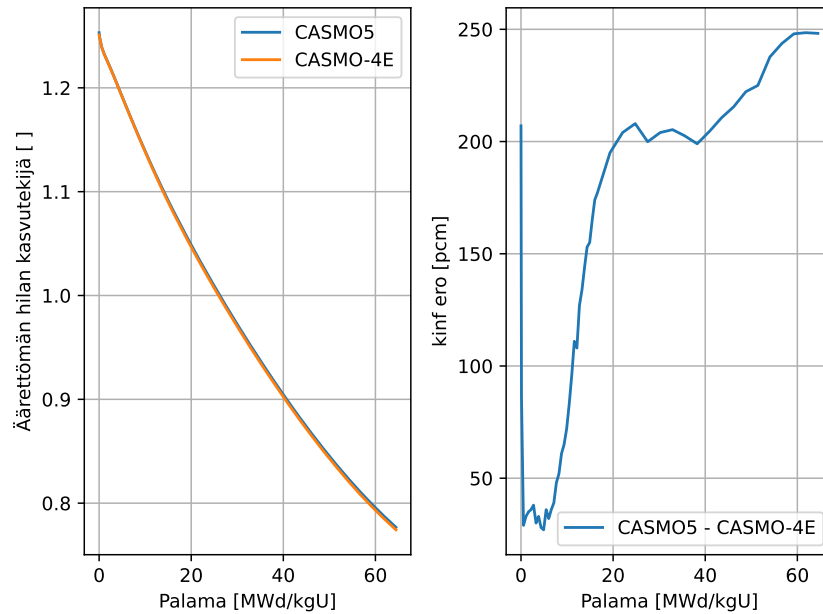
Liitteessä 2 on esitetty myös muut sydäntason laskuihin vaikuttavien parametrien erot.

Kuvissa 50 ja 51 on esitetty erot epäjatkuuustekijöissä, kuvissa 52 ja 53 diffuusiovakioissa, kuvissa 54 ja 55 neutronien käänteisnopeuksissa ja kuvassa 56 merkittävimmän prekursoriryhmän 4 viivästyneiden neutronien osuuksissa. Suureiden erojen suuruusluokka on samaa suuruusluokkaa kuin ryhmävaikutusaloissa. Suureista huomioidaan erityisesti nopean ryhmän diffuusiokerroin ja epäjatkuuustekijät. Kuvasta 52 nähdään, että nopean ryhmän diffuusiovakion trendi palaman funktiona poikkeaa CASMO-ohjelmien välillä: CASMO-4E-ohjelmalla trendi on enemmän nouseva ja CASMO5-ohjelmalla enemmän laskeva. Nopean ryhmän diffuusiovakion ero on suurimmillaan nollapalamalla lähes kaksi prosenttia. Epäjatkuuustekijät huomioidaan erityisesti, koska CAXMAN-ohjelman tekemää luentaa on muutettu niiden suhteen, kun CASMO5-ohjelma on käytössä. Kuvien 50 ja 51 perusteella CAXMAN lukee epäjatkuuustekijät oikein, sillä epäjatkuuustekijöiden trendi ja kokoluokka on samankaltainen CASMO-ohjelmien välillä.

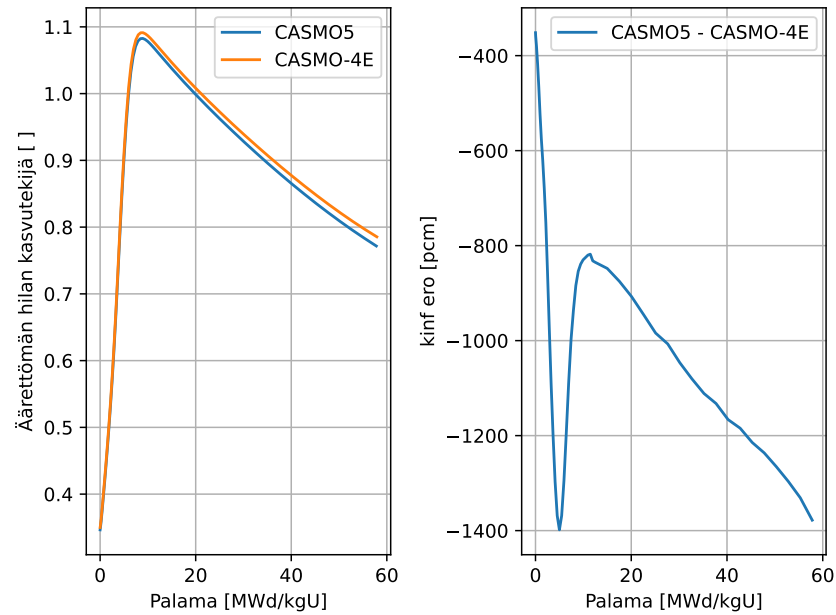
Sauvatason vertailutuloksista esitetään tässä kasvutekijät ainoastaan kulmasauvaa vastaavalle makroalueelle 1 sekä gadoliniumsauvaa vastaavalle makroalueelle 5. Edelliseen kiinnitetään erityistä huomiota, koska sen ryhmävaikutusaloille tehtävää CAXMAN-ohjelman korjausta on muutettu ja jälkimmäinen huomioidaan, koska ilmenee, että gadoliniumsauvojen kasvutekijäkäyttäytyminen eroaa merkittävästi muiden sauvojen käytöksestä CASMO-ohjelmien välillä. Loppujen luvussa 5.2 mainittujen edustavien makroalueiden kasvutekijät ja nippujen välisen alueen migraatioala ovat nähtävillä liitteessä 3.

Kuvissa 17 ja 18 on esitetty kulmasauvaa ja gadoliniumsauvaa vastaavien makroalueiden kasvutekijäerot polttoaineen A kiinteällä nipulla. Vertaamalla kuvan 17 kulmasauvan kasvutekijöitä reunasauvaa ja tavallista sauvaa vastaavien makroalueiden kasvutekijöihin, liitteen 3 kuvista 58 ja 59 havaitaan, että kasvutekijäkäytöksessä ei ole merkittävän suuruisia eroja, jotka antaisivat esimerkiksi syytä epäillä, että kulmasauvan makroalueelle tehtävä korjaus olisi epäonnistunut. Kuvasta 18 nähdään, että CASMO5-ohjelmalla lasketuilla ryhmävaikutusaloilla gadoliniumsauva on merkittävästi vähemmän reaktiivinen kuin CASMO-4E-ohjelmalla lasketuilla ryhmävakioilla, mikä herättää syyn epäillä virhettä ryhmävaikutusalojen jälkikäsitelyssä. Kuitenkin liitteen 3 kuvan 57 perusteella, jos sauva ei sisällä gadoliniumia, kasvutekijöiden ero CASMO-ohjelmien välillä ei ole merkittävämpi kuin muilla sauvoilla. CAXMAN-ohjelma ei käsittele gadoliniumia sisältävää sauvaa eri tavalla verrattuna sauvaan, joka ei sisällä gadoliniumia, joten kuvan 18

merkittävät kasvutekijäerot liittyvät oletettavasti gadoliniumin käsittelyeroihin CASMO-ohjelmissa, eivätkä virheisiin jälkikäsittelyssä. Virhettä jälkikäsittelyssä ei ole myöskään syytä epäillä liitteen 3 kuvan 60 perusteella, josta nähdään, että nippujen välisen alueen migraatioaloissa on noin kahden prosentin tasoero polttoaineen A kiinteällä nipulla.



Kuva 17. Polttoaineen A kiinteän nipun kulmassa sijaitsevan sauvakopin äärettömän hilan kasvutekijän erot, kun ryhmävaikutusalat on laskettu CASMO-ohjelmilla.



Kuva 18. Polttoaineen A kiinteän nipun gadoliniumsauvakopin äärettömän hilan kasvutekijän erot, kun ryhmävaikutusalat on laskettu CASMO-ohjelmilla.

6.3 Tasapainolatausten vertailutulokset

Kaikki tasapainolatausten reaktorifysikaalisten ominaisuuksien vertailukuvat ja -taulukot ovat nähtävillä liitteessä 4. CASMO-ohjelmien avulla laskettuja MOD5-vakioita kutsutaan tässä lyhyesti CASMO5- ja CASMO-4E-vakioiksi. Osassa tuloksista ilmoitetaan myös absoluuttiarvot, jotta erojen merkitys CASMO-vakioiden välillä olisi selkeämpää. Tulosten absoluuttiarvoja ei ole lisätty liitteeseen 4.

6.3.1 Kriittinen boorikonsentraatio

Täyden tehon kriittinen boorikonsentraatio on kuvan 61 perusteella pienempi jakson aikana CASMO5-vakioilla eron ollessa suurin jakson alussa, jolloin se on noin 30 ppm. Absoluuttinen ero pienenee kohti jakson loppua, mikä on odotettavissa, sillä absoluuttinen boorikonsentraatio pienenee. CASMO5-vakioilla laskettu kriittinen boorikonsentraatio on jakson alussa 1095 ppm. Kuvan 61 kriittisen boorikonsentraation erokäyrän muutosvauhdissa on havaittavissa pientä vaihtelua energian funktiona, mikä tarkoittaa, että

boorikonsentraation pieneneminen palamayksikköä kohti on hieman erilaista CASMO5- ja CASMO4-vakioiden välillä. Kriittisen boorikonsentraation käytöksen perusteella CASMO5-vakioilla reaktori ennustetaan vähemmän reaktiiviseksi, mutta on kuitenkin muistettava, että CASMO-4E vakioita käytettäessä sydämen reaktiivisuutta nostetaan keinotekoisesti 320 pcm:ää enemmän kuin CASMO5-vakioita käytettäessä. Kuvasta 62 nähdään, että kriittisen boorikonsentraation erokäyttäytyminen on samankaltaista kuin täyden tehon tilanteessa säätävän ryhmän asennolla 200 cm sekä kuumassa tilassa tasapaino- ja nollaksenonilla säätävän ryhmän asennoilla 100 ja 200 cm. Kuumassa tilassa, jossa reaktorin isoterminen lämpötila on 260 °C ja säätävän ryhmän asento 200 cm, kriittinen boorikonsentraatio ennustetaan 19 ppm:ää pienemmäksi CASMO5-vakioilla, kuten nähdään taulukosta 13. Kyseinen kriittinen boorikonsentraatio mitataan vaihtolatauksen jälkeen tehtävissä fysikaalisissa kokeissa ja sen on oltava kokeiden hyväksymiskriteerien mukaan 52,5 ppm:n päässä ennustetusta tuloksesta. CASMO5-vakioilla ennustettu fysikaalisten kokeiden kriittinen boorikonsentraatio on 1723 ppm.

6.3.2 Sammutusmarginaalit ja säätösauvojen tehokkuudet

Sammutusmarginaali kuvaa reaktiivisuusmäärää, jolla reaktori on alikriittinen. Täyden boorauksen boorihappokonsentraatiolla 13 g/kg, tasapainosamariumilla, nollaksenonilla ja säätösauvat täysin ulosvedettynä, CASMO5-vakioilla sammutusmarginaali on kaikissa isotermissä lämpötiloissa noin 100 – 200 pcm:ää suurempi ja kasvaa lämpötilan funktiona (taulukko 13). Suhteellinen ero on noin 3 – 6 % riippuen isoteremisestä lämpötilasta. CASMO5-vakioilla täydellä boorauksella sammutusmarginaali ilman säätösauvoja on yli 3000 pcm kaikissa isotermissä lämpötiloissa.

Taulukosta 16 nähdään, että isotermissä lämpötilassa 174 °C pikasulun aiheuttama sammutusmarginaali ilman ylimääräistä boorausta on jakson alussa 77 pcm pienempi ja jakson lopussa, jolloin boorikonsentraatio on nolla, 12 pcm suurempi CASMO5-vakioilla. Ilman tehokkainta säätösauvaa sammutusmarginaalit ovat 57 ja 11 pcm pienemmät jakson alussa ja lopussa CASMO5-vakioilla. Suhteelliset erot ovat pieniä, sillä sammutusmarginaali on molemmilla CASMO-vakioilla jakson alussa reilusti yli 6000 pcm ja reaktiivisimman sauvan juuttuessa lähes 4000 pcm. Jakson lopussa vastaavat luvut ovat lähes 4000

ja 2000 pcm. Tasapainolatauksen hyväksyttävyyden kannalta tärkein edellä mainituista on pikasulun aiheuttama sammutusmarginaali jakson lopussa ilman tehokkainta säätösauvaa nollaborilla, sillä tällöin sammutusmarginaali on pienimmillään. Vaatimuksena on vähintään 1000 pcm:n sammutusmarginaali, mikä toteutuu selvästi CASMO5-vakioilla (ja CASMO-4E-vakioilla).

Säätösauvan tehokkuus määritetään ylös jääneille säätösauvoille ja säätösauvaryhmille laskemalla reaktorin reaktiivisuus kun kaikki paitsi laskettava säätösauva tai säätösauvaryhmä on sisällä sydämessä ja vähentämällä tuloksesta reaktiivisuus, kun kaikki säätösauvat ovat sisällä sydämessä. Seuraavassa käsitellään ainoastaan säätösauvaryhmien tehokkuuksia; erot yksittäisten sauvojen tehokkuuksissa on nähtävillä taulukosta 15. Reaktorissa on kuusi säätösauvaryhmää, joista yksi on tehon säätöön osallistuva säätävä ryhmä. Tiettyyn ryhmään kuuluvan säätösauvan paikka reaktorissa voidaan havainnollistaa kuvan 12 avulla: säätävän ryhmän 6 säätösauvat sijaitsevat paikoissa 1 ja 7, ryhmän 1 sauva paikassa 10, ryhmän 2 sauva paikassa 30, ryhmän 3 sauva paikassa 33, ryhmän 4 sauva paikassa 50 ja ryhmän 5 sauva paikassa 4. Jakson alussa kuumassa tilassa, jossa isoterminen lämpötila on 260 °C, tehokkuuksien eron itseisarvo säätösauvaryhmien 1 ja 6 tehokkuudessa on alle 10 pcm ja ryhmien 2, 3 ja 4 tehokkuudessa 10 pcm:n luokkaa. Jakson alussa merkittävin ero on ryhmän 5 tehokkuudessa, jossa CASMO5-vakioilla tehokkuus on noin 70 pcm suurempi. Jakson lopussa CASMO5-vakioilla kaikkien ryhmien tehokkuus kuumassa tilassa on joillakin kymmenillä pcm:llä suurempaa eron ollessa edelleen suurin ryhmässä 5 noin 80 pcm. Pikasulun tehokkuus (kaikki ryhmät työnnetään sydämeen) on jakson alussa 40 pcm suurempi ja jakson lopussa 70 pcm suurempi CASMO5-vakioilla. Myös ilman reaktiivisinta sauva CASMO5-vakioilla pikasulun tehokkuus on suurempi ja jakson alun sekä lopun arvot ovat vastaavasti 60 ja 30 pcm. Suhteelliset erot ovat jälleen pieniä, sillä molemmilla CASMO-vakioilla pikasulun tehokkuus on sekä jakson alussa että lopussa yli 10 000 pcm ja reaktiivisimman sauvan juuttuessa yli 7000 pcm.

Kuvan 82 perusteella säätävän ryhmän reaktiivisuusvaikutus per ryhmää liikutettu pituusyksikkö (differentiaalinen reaktiivisuusarvo) on CASMO5-vakioilla pienempi alle 100 cm sydämen korkeudella (maksimissaan noin 0,2 ja 0,6 pcm/cm pienempi jakson alussa ja lopussa vastaavasti). Sydämen yläosassa yli 100 cm korkeudella CASMO5-vakioilla differentiaalinen reaktiivisuusarvo on suurempi (maksimissaan noin 0,2 ja 0,4

pcm/cm suurempi jakson alussa ja lopussa vastaavasti). Kokonaan sydämeen työnnetyn säätävän ryhmän integraalinen reaktiivisuusarvo on noin 10 pcm suurempi CASMO5-vakioilla nollatehotilassa sekä jakson alussa että lopussa. Tehotilassa säätävän ryhmän pienin sallittu asento on 235 cm (säätösauva 15 cm työntyneenä sydämeen), millä varmistetaan riittävä sammutusmarginaali jakson lopussa tapahtuvassa höyryputken katkeamisonnettomuudessa (Vehmaanperä, 2020, 17). CASMO5-vakioilla säätävän ryhmän differentiaalinen reaktiivisuusarvo on noin 0 – 0,2 pcm/cm suurempi sekä jakson alussa että lopussa. Differentiaalisen reaktiivisuusarvon suuruusluokka CASMO5-vakioilla on tehotilassa maksimissaan noin 9 pcm/cm.

6.3.3 Tehojakaumat

Tehojakaumien tasaisuutta kuvataan muotokertoimien avulla. Loviisan voimalaitoksen lautaussuunnittelussa käytetään pääasiassa neljää muotokerrointa, joille käytetään nimityksiä radiaalimuotokerroin, 3D-muotokerroin, nippujen sisäisen tehojakauman muotokerroin ja kokonaismuotokerroin. Ensimmäinen määrittellään suurimman nipputehon suhteena sydämen keskimääräiseen nipputehoon, toinen nippunoodin suurimman tehotiheyden suhteena sydämen keskimääräiseen tehotiheyteen (yksi nippu jaetaan aksiaalisuunnassa kymmeneen noodiin), kolmas nipun suurimman sauvatehon suhteena saman nipun keskimääräiseen sauvatehoon ja neljäs suurimman sauvakohtaisen lineaaritehon suhteena koko sydämen keskimääräiseen lineaaritehoon. Lisäksi tehojakaumien kuvaamiseen käytetään suhteellista aksiaalista tehojakaumaa, suhteellisia nipputehoja (suurin suhteellinen nipputeho on radiaalimuotokerroin) ja suhteellisia nooditehoja (nipun nooditehot jaettuna sydämen keskimääräisellä nooditeholla).

Tehojakaumat ovat muotokertoimien perusteella tasaisemmat CASMO5-vakioilla koko jakson aikana. Muotokertoimien erot ovat suurimmillaan radiaalimuotokertoimessa noin 0,011 jakson puolella välissä, 3D-muotokertoimessa noin 0,012, kun neljäsosa jaksosta on kulunut ja kokonaismuotokertoimessa noin 0,020 jakson alussa (kuva 69 ja taulukko 14). Radiaalimuotokertoimen ja 3D-muotokertoimen eroissa on havaittavissa selkeä ”tasomuutos”, jossa siirtymä pienemmistä eroista maksimieroihin saavutetaan nopeasti, jonka jälkeen erot säilyvät selvästi suurempina, joskin erot pienenevät jakson

loppua kohti. Kokonaismuotokertoimessa samanlaista äkillistä tasomuutosta ei havaita. Erot radiaali- ja 3D-muotokertoimissa ovat jakson aikana maksimissaan prosenttiyksikön luokkaa ja kokonaismuotokertoimen ero on maksimissaan noin kahden prosenttiyksikön luokkaa. Muotokertoimien kokoluokkaa voidaan kuvata CASMO5-vakioilla saaduilla jakson rajoittavinta radiaalimuotokerrointa vastaavilla muotokertoimilla: radiaali-muotokerroin, 3D-muotokerroin ja kokonaismuotokerroin ovat vastaavasti 1,308, 1,528 ja 1,906.

Suhteellinen aksiaalinen tehojakauma määritetään laskemalla ensin keskiarvoinen nooditeho kymmenellä aksiaalitasolla ja sen jälkeen muodostamalla laskettuihin aksiaalitasojen keskiarvoihin keskiarvoisella aksiaaliteholla normitettu sovite. Kuvan 71 perusteella suhteellinen aksiaalinen teho on sekä jakson alussa että lopussa noin 0,6 prosenttiyksikköä pienempi sydämen yläosassa CASMO5-vakioilla. Aksiaalisen tehon suhteellisen eron käyttäytyminen on erilaista reaktorin alaosassa: jakson alussa tehojakauma on noin 0,5 prosenttiyksikköä suurempi CASMO5-vakioilla, mutta jakson lopussa ero on ”käännytyn”, jolloin CASMO5-vakioilla sydämen alaosassa on noin 0,3 prosenttiyksikköä pienempi suhteellinen aksiaalinen tehojakauma. Jakson alussa CASMO5-vakioilla sydämen alaosa tuottaa siis enemmän tehoa ja yläosa vähemmän tehoa verrattuna CASMO-4E-vakioihin. Jakson lopussa CASMO5-vakioilla tuotetaan suhteellisesti enemmän tehoa sydämen keskiosassa.

Aksiaalijakauman eroja tukevat suhteellisten nooditehojen erot, jotka on esitetty jakson alussa ja lopussa taulukoissa 20 ja 21. CASMO5-vakioilla jakson alussa sydämen alaosien noodeissa suhteellinen nooditeho on selvästi suurempaa ja sydämen yläosassa selvästi pienempää. Jakson lopussa suhteelliset nooditehot ovat keskimäärin selvästi suurempia sydämen keskinoodeissa ja pienempiä sydämen ylä- ja alaosien noodeissa. Keskimääräinen nooditeho on riippumaton CASMO-vakioista, joten suhteellisen nooditehon tilalla voidaan puhua myös nooditehosta (eli esimerkiksi sydämen alaosassa nooditeho on suurempaa CASMO5-vakioilla jakson alussa). Nooditehojen erojen itseisarvo on jakson alussa pienempi kuin kaksi prosenttiyksikköä ja jakson lopussa paikan 21 nippua lukuun ottamatta pienempi kuin yksi prosenttiyksikkö. Aksiaalitehojakauman ja nooditehojen vertailussa on hyvä muistaa, että absoluuttinen teho on jakson alussa selvästi suurempaa sydämen keskellä kuin ylä- ja alaosassa. Jakson lopussa taas absoluuttisesti eniten

tehoa tuotetaan noin korkeuksilla 0,5 m ja 2 m.

Nipun sisäisten tehojakaumien muotokertoimien eroissa korostuu kuvista 67 ja 68 selvästi sektori, johon on ladattu pääosin toisen ja kolmannen vuoden nippuja. Kyseisessä sektorissa sisäisten tehojakaumien muotokertoimet ovat koko jakson aikana 0,5–0,6 prosenttiyksikköä pienemmät CASMO5-vakioilla. Suurin ero saadaan symmetria-akselin säätösauvoryhmien kuusi (paikka 1) ja yksi (paikka 10) polttoainejatkeille, joissa ero on jakson aikana 0,6–0,8 prosenttiyksikköä. Lisäksi huomautetaan, että jakson alussa paikkoihin 33 ja 55 asetetuilla tuoreilla polttoainejatkeilla CASMO5-vakioilla sisäinen tehojakauma on korostetusti tasaisempi verrattuna muuhun jaksoon. Sisäiset tehojakaumat ovat tasaisemmat CASMO5-vakioilla kaikissa nipuissa koko jakson aikana.

Suhteelliset nipputehot ovat tuoreissa nipuissa CASMO5-vakioilla pienemmät koko jakson ajan. Sitä vastoin vanhemmissa nipuissa suhteelliset nipputehot ovat pääsääntöisesti suuremmat. Erityisesti tämä johtaa siis siihen, että CASMO5-vakioilla sydämen keskusta, jossa on pääsääntöisesti kolmannen vuoden nippuja ja sydämen reuna, jossa on kahta tuoretta nippua lukuun neljännen vuoden nippuja, toimivat suuremmalla teholla ja tuottavat enemmän energiaa kuin CASMO-4E-vakiot (keskimääräinen nipputeho ei riipu CASMO-vakioista). Erot suhteellisissa nipputehoissa on näytetty kuvissa 65 ja 66.

6.3.4 Termiset nousuvarat

Lataussuunnittelun kannalta tärkeimmät laskettavat termohydrauliset suureet ovat polttoainesauvojen lineaaritehot, jäähdytteen lähtölämpötilat ja entalpianosut alikanavista sekä DNB-suhteet (kriittisen lämpövuon suhde paikalliseen lämpövuohon). Kyseisiä suureita on käsitelty luvussa 3.4.3.

Lineaaritehon, jäähdytteen lähtölämpötilan ja DNB-suhteen suuruusluokka voidaan kuvata CASMO5-vakioilla saaduilla arvoilla, jotka vastaavat edellä mainittujen suureiden suhteen rajoittavinta tilaa. Tämä tila saadaan jakson alussa nollaenergialla ja siinä lineaariteho, jäähdytteen lähtölämpötila kuumimmasta alikanavasta ja pienin DNB-suhde ovat vastaavasti 305 W/cm, 322 °C ja 3,28. Suurimmat jakson aikaiset lineaaritehot ovat CASMO5-vakioilla noin 3 W/cm pienempiä, mikä näkyy jakson aikana suurempana li-

neaaritehovarana, entalpianousuvarana ja DNB-suhteena sekä pienempänä alikanavasta poistuvan jäädytteen lämpötilana (taulukko 14). Kuvan 72 perusteella maksimilineaaritehot ovat jakson alussa CASMO5-vakioilla noin 3 W/cm pienempiä paikoissa, joissa on tuoreet niput ja noin 1 W/cm pienempiä paikoissa, joihin on ladattu toisen vuoden nippu (poikkeus on paikan 11 tuore kiinteä nippu, jossa lineaariteho on hieman suurempi CASMO5-vakioilla). Vanhemmille nipuille ero on päinvastainen: jakson alussa sydämen keskelle ja reunaan ladatuissa kolmannen ja neljännen vuoden nipuissa CASMO5-vakioilla nippujen suurimmat lineaaritehot ovat 1–2 W/cm suurempia. Jakson lopussa erojen itseisarvot ovat pienentyneet pois lukien paikan 11 poikkeusnippu, jossa CASMO5 vakioilla lineaariteho on 2 W/cm pienempi. Keskimääräisten lineaaritehojen erokäyttäytyminen jakson alussa ja lopussa on samankaltaista kuin maksimilineaaritehojen (kuva 73). Pienin lineaaritehovara, entalpianousuvara ja DNB-suhde ovat vastaavasti 1,1; 0,2 ja 2 prosenttiyksikköä suurempia CASMO5-vakioilla ja rajoittavin tila tapahtuu molemmilla CASMO-vakioilla jakson alussa nollaenergialla. Eroja yksittäisten sauvojen lineaaritehoissa voidaan tarkastella kuvista 76 ja 77, joissa sydämen 60 asteen sektorin jokaisen sauvan maksimilineaaritehot eri jakson energioilla on esitetty palamaeron funktiona. Kuvien perusteella sauvojen maksimilineaaritehojen erojen itseisarvot ovat alle 4 W/cm jakson alussa ja noin 2,5 W/cm jakson lopussa. Kuvista erottuvat erityisesti jakson alun tuoreiden nippujen sauvat, joissa CASMO5-vakioilla on keskimäärin pienempi maksimilineaariteho.

Erot alikanavan maksimilähtölämpötiloissa ja entalpianousuvaroissa seuraavat odotettavasti kuvien 78 ja 79 perusteella eroja lineaaritehoissa jakson aikana: paikoissa, joissa CASMO5-vakioilla maksimilineaariteho on pienempi, maksimilähtölämpötila ja entalpianousuvara on suurempi ja päinvastoin. Tämä tarkoittaa siis, että alikanavasta poistuva jäädyte on CASMO5-vakiolla kuumempaa sydämen reunalla ja keskellä paikoissa, joissa on kolmannen ja neljännen vuoden nippuja. Toisaalta alikanavasta poistuva jäädyte on kylmempää paikoissa, joihin on ladattu tuoreita tai toisen vuoden nippuja. Erojen itseisarvon maksimi ei kuitenkaan ylitä yhtä celsiusastetta jakson aikana ja nippukohtaisten erojen itseisarvot pienevät jakson loppua kohti.

6.3.5 Palamajakaumat

Tasapainolatauksen hyväksyttävyyden kannalta tärkein palama-arvo on nipun suurin keskipalama jakson lopussa. Ero CASMO-vakioiden välillä on hyvin pieni suurimman nipun keskipalaman suhteen: molemmilla vakioilla jakson lopun suurimman keskipalaman nipu sijaitsee 30 asteen symmetria-akselilla paikassa 21, missä keskipalama on yhden desimaalin tarkkuudella 53,2 MWd/kgU. Kuvassa 63 nippujen keskipalamien erot CASMO-vakioiden välillä on esitetty jakson alussa ja lopussa. Erot nippujen keskipalamissa seuraavat eroja suhteellisissa nipputehoissa: ensimmäisen ja toisen vuoden nipuissa, joissa suhteellinen nipputeho on pienempi CASMO5-vakioilla, myös nippujen keskipalama on pienempi. Ensimmäisen ja toisen vuoden aikana kertyneiden keskipalamien erojen itseisarvot pienenevät kolmannen ja neljännen vuoden nipuissa, joissa suhteellinen nipputeho on CASMO5-vakioilla suurempi. Lukuun ottamatta sydämen keskustaani ladattuja kolmannen ja neljännen vuoden nippuja ja reunaan ladattuja kolmea neljännen vuoden nippua, nippujen keskipalamat ovat pienempiä CASMO5-vakioilla. Erot ovat kuitenkin pieniä: jakson alun ja lopun perusteella kaikissa paikoissa nipun keskipalaman eron itseisarvo on pienempi kuin 0,2 MWd/kgU.

Kuvasta 64 nähdään, että maksimisauvapalamien erokäyttäytyminen on samankaltaista keskimääräisten nippupalamien erokäyttäytymisen kanssa: CASMO5-vakioilla maksimisauvapalamat ovat pienempiä kahden ensimmäisen vuoden nipuissa ja erot tasoittuvat kolmannen ja neljännen vuoden nipuissa. Huomionarvoinen ero CASMO-vakioiden välillä on, että maksimisauvapalamat ovat jakson alun ja lopun perusteella kaikissa paikoissa pienempiä CASMO5-vakioilla. Suurin ero on 0,26 MWd/kgU symmetriapaikkojen 32 ja 44 toisen vuoden kiinteissä nipuissa. Suurin sauvapalama CASMO5-vakioilla saadaan odotetusti samassa nipussa kuin suurin keskinippupalama eli paikassa 21, jossa maksimisauvapalama on 59,1 MWd/kgU.

Erot noodipalamissa on esitetty taulukoissa 18 ja 19. Pääasiassa sekä jakson alussa että lopussa noodipalamat ovat CASMO5-vakioilla pienempiä ylimmissä ja alimmissa noodeissa. Jakson alussa joissakin kolmannen ja neljännen vuoden nipuissa joidenkin keskusnoodien palama on suurempaa. Jakson lopussa kaikista kolmannen ja neljännen vuoden

nipuista löytyy keskusnoodeja, joiden palama on suurempaa CASMO5-vakioilla. Noodipalamien erojen itseisarvo on maksimissaan 0,30 MWd/kgU ja pääsääntöisesti erot ovat paljon pienempiä. CASMO5-vakioilla suurin noodipalama on 59,3 MWd/kgU keskipalaltaan suurimmassa nipussa 21.

6.3.6 Reaktiivisuuskertoimet

Reaktiivisuuskertoimet kertovat paljonko sydämen reaktiivisuus muuttuu tilamuuttujan muutosta kohti. Loviisan voimalaitoksen lataussuunnittelussa lasketaan viisi reaktiivisuuskeroa, joista yksi lasketaan isotermisessä kuumassa tilassa eli lämpötilassa 260 °C nollateholla ja loput tehotilassa. Kaikki reaktiivisuuskertoimet lasketaan sekä jakson alussa että lopussa ja ne ilmoitetaan negatiivisina tai positiivisina lukuina riippuen siitä, seuraavatko ne tilamuuttujan muutoksen merkkiä eli jos esimerkiksi tilamuuttujan positiivisesta muutoksesta seuraa reaktiivisuuden pieneneminen, vastaava reaktiivisuuskero on negatiivinen.

Isotermisessä kuumassa tilassa laskettava reaktiivisuuskero on isoterminen lämpötilakerroin, joka kuvaa reaktiivisuusmuutoksen kaikkien polttoainekomponenttien lämpötilan muutosta kohti. Lämpötilan muutoksen reaktiivisuusvaikutus liittyy pääasiassa jäähdytteen lämpötilamuutoksesta seuraavaan tiheysmuutokseen, mutta jonkin verran reaktiivisuusvaikutusta on myös polttoaineen lämpötilan muutoksella (Vehmaanperä, 2020, 14). Jäähdytteen molekyylilämpötilan muutoksen reaktiivisuusvaikutus oletetaan vähäiseksi (Vehmaanperä, 2020, 14). Jakson alussa jäähdytteen isoterminen reaktiivisuuskero lasketaan säätävän ryhmän asennolla 200 cm kriittisellä boorikonsentraatiolla, mikä vastaa reaktorin käynnistystilaa. Tässä kriittisessä tilassa isoterminen jäähdytekerroin on suurimmillaan, sillä jäähdytteen boorikonsentraatio on myös suurimmillaan: reaktorin tehotiloissa kriittinen boorikonsentraatio on pienempi, vaikka säätävä ryhmä olisi kokonaan ulosvedetyssä asennossa. Jos isoterminen jäähdytekerroin on negatiivinen käynnistystilaa vastaavassa kriittisessä tilassa, se voidaan todeta negatiiviseksi kaikissa kriittisissä tiloissa, mikä on vaatimus, jonka suunnitellun latauksen on toteutettava¹⁰. Isoter-

¹⁰Mitä suurempi jäähdytteen (ja moderaattorin) boorikonsentraatio on, sitä enemmän siinä tapahtuu neutronien absorptioita moderoinnin sijasta. Näin ollen mitä suurempi on jäähdytteen boorikonsentraatio, sitä vähemmän alimoderoidumpi reaktori on ja sitä vähemmän reaktiivisuus pienenee jäähdytteen tiheyden pie-

minen reaktiivisuuskerroin lasketaan lisäksi jakson lopussa säätävän ryhmän täysin ulosvedetyllä asennolla kriittisellä boorilla olettamalla, että jäähdytteen boorikonsentraatio on nolla. CASMO5-vakioilla reaktiivisuuden isoterminen lämpötilakerroin on taulukon 17 perusteella jakson alussa 1,86 pcm/°C pienempi ja jakson lopussa 2,93 pcm/°C pienempi. Isoterminen lämpötilakerroin on CASMO5-vakioilla -10,53 pcm/°C, joten ero CASMO-vakioiden välillä on melko suuri. Vaatimus isotermisen lämpötilakerroimen negatiivisuudesta kuitenkin toteutuu laskennan perusteella selvästi jakson aikana molemmilla CASMO-vakioilla. Negatiivisuus varmistetaan vaihtolatauksen jälkeen tehtävissä fysikaalisissa kokeissa.

Täyden tehon tilassa säätävän ryhmän asennolla 250 cm laskettavat reaktiivisuuskertoimet ovat jäähdytteen (ei moderaattorin) tiheyskerroin ja lämpötilakerroin, polttoaineen¹¹ lämpötilakerroin, boorikerroin sekä tehokerroin. Neljän ensimmäisen merkitys on itsestään selvä. Tehokertoimella tarkoitetaan reaktiivisuusmuutosta reaktorin lämpötehon muutosta kohti. Lämpötehon muutoksessa reaktiivisuus muuttuu pääosin, koska polttoainepellettien ja jäähdytteen lämpötilat sekä Xe-135- ja Sm-149-atomitiheydet muuttuvat. Kahden ensimmäisen vaikutus reaktiivisuuteen on tehon muutosta päinvastaiseen suuntaan ja kolmannen vaikutus on tehon muutoksen suuntaan. Toisin sanottuna, kun reaktorin teho kasvaa, polttoainepellettien lämpötila kasvaa ja jäähdytteen tiheys pienenee, minkä seurauksena reaktiivisuus pienenee. Toisaalta tehon kasvu aiheuttaa välittömän pienenemisen neutronimyrkkykonsentraatioissa, minkä seurauksena reaktiivisuus kasvaa. Yhteisvaikutus on kuitenkin selvästi se, että tehon kasvu aiheuttaa reaktiivisuuden pienenemisen ja toisaalta tehon pieneneminen aiheuttaa reaktiivisuuden kasvun. Reaktiivisuuden tehokerroin on siis negatiivinen. Tehotiheyden muutoksesta aiheutuva polttoaineen lämpötilan muutos lasketaan HEXBU-3D-ohjelman syötetiedostossa ennalta määritetyn polynomi-sovitteen avulla.

Täyden tehon tilan reaktiivisuuskertoimien erot jakson alussa ja lopussa CASMO-vakioiden välillä ovat nähtävillä taulukossa 17. Jäähdytteen tiheyskerroimen reaktiivisuuskerroin on ainoa positiivinen kerroin, joten CASMO5-vakioilla reaktiivisuusmuutoksien

nentyessä.

¹¹Sanan ”polttoaine” käyttö on tässä yhteydessä hieman hämäävää, sillä ”polttoaine”-nimitystä voidaan käyttää kuvaamaan polttoainepellettien heterogeenisistä komponenteista muodostuvaa kokonaisuutta. Tässä ”polttoaineella” tarkoitetaan kuitenkin ainoastaan lämpötehoa tuottavaa aluetta eli polttoainepellettä.

itseisarvot ovat suurempia kaikissa reaktiivisuuskertoimissa sekä jakson alussa että lopussa. Erot ovat suurimmat polttoaineen lämpötilakertoimessa ja tehokertoimessa, joissa CASMO5-vakioilla kertoimet ovat vastaavasti noin 7 % ja 8 % pienempiä (itseisarvoltaan suurempia).

6.3.7 Pistekineettiset parametrit

Jakson alussa tehtävissä fysikaalisissa kokeissa säätösauvojen kiinnitykset testataan ajamalla vuorotellen jokaisen säätösauvaryhmän sauva sydämen sisään lähtöasennosta, joka on säätävälle ryhmälle noin 200 cm ja muille ryhmille 250 cm. Sauvan sisään ajamisesta aiheutuva reaktiivisuusmuutos mitataan reaktiivisuusmittarilla. Reaktiivisuusmittari laskee reaktiivisuuden niin sanotulla käänteiskineettisellä menetelmällä, jossa tarvitaan tietoa prekursoriryhmien 1 – 6 viivästyneiden neutronien osuuksista ja hajoamisvakioista sekä kerkeiden neutronien eliniästä (Kuusisto, 2003, 7). Hajoamisvakioina on historiallisesti käytetty aina U-235-fissioprekursorin niin sanottuja ”Keepinin parametreja” (ks. esimerkiksi viite (Lamarsh ja Baratta, 2001, 88)), mutta viivästyneiden neutronien osuudet ja kerkeiden neutronien elinikä lasketaan HEXBU-3D-ohjelmalla (Kaloinen, 1992, 11) ja päivitetään reaktiivisuusmittariin¹². HEXBU-3D-ohjelman laskemat viivästyneiden neutronien osuudet ja kerkeiden neutronien elinikä riippuvat CASMO-ohjelmien laskemista kineettisistä parametreista. Kerkeiden neutronien eliniän laskemista varten HEXBU-3D tarvitsee CASMO-ohjelman laskemat vuo- ja adjointvuo painotetut käänteisnopeudet ja viivästyneiden neutronien osuuksien laskemista varten CASMO-ohjelman laskemat viivästyneiden neutronien osuudet. Jälkimmäiset perustuvat CASMO-ohjelmissä käytettyyn viivästyneiden neutronien dataan (ks. viitteen (Hykes et al., 2022a, 126) yhtälö 8.53). CASMO5- ja CASMO-4E-ohjelmien oletuksena käyttämä viivästyneiden neutronien data (viivästyneiden neutronien osuudet ja hajoamisvakiot eri prekursoriryhmissä) on CASMO5-manuaalin perusteella hyvin samanlaista, sillä eroa on ainoastaan yhden fissioprekursorin Pu-242 datassa (Hykes et al., 2022a, 129, 131). CASMO5-ohjelma sisältää mahdollisuuden valita viivästyneiden neutronien data useasta eri vaihtoehdosta, joista esimerkiksi yksi on CASMO-4-ohjelmassa oletuksena käytetty data. Tässä työssä on kuitenkin

¹²Jos muutokset lasketuissa kineettisissä parametreissa ovat pieniä jo käytössä oleviin parametreihin, niitä ei päivitetä vuosittain (Vehmaanperä, 2020, 16).

käytetty ainoastaan CASMO5-oletusdataa viivästyneille neutroneille.

Taulukosta 17 havaitaan, että erot CASMO-vakioiden välillä prekursoriryhmien viivästyneiden neutronien osuuksissa ovat pienempiä kuin 0,005 prosenttiyksikköä sekä jakson alussa että lopussa. CASMO5-vakioilla kerkeiden neutronien elinikä on jakson alussa 0,1 μs suurempi ja jakson lopussa 0,1 μs pienempi. Efektiivinen viivästyneiden neutronien osuus ja kerkeiden neutronien elinikä ovat CASMO5-vakioilla vastaavasti 0,581 % ja 16,8 μs .

6.4 Teoreettisten suureiden vertailu mitattuihin suureisiin

Luvuissa 6.4.1 ja 6.4.2 esitetään vastaavasti teoreettisten nipputehojen ja teoreettisen kriittisen boorikonsentraation erot mitattuihin arvoihin. Vertailu koske Loviisa-1-reaktorin jaksoa 43 ja lasketut suureet on saatu offline-RESU-98-laskennalla ilman vuosovitusta lämpötila- tai neutronivuomittauksiin.

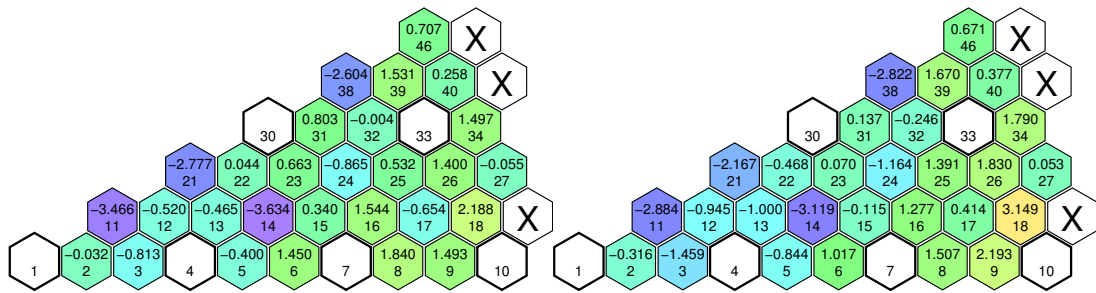
6.4.1 Suhteellisen nipputehon vertailu mittauksiin

Erot lasketuissa ja mitatuissa suhteellisissa nipputehoissa eri jakson energioilla on esitetty kuvassa 19 CASMO-4E-vakioilla laskettuna ja kuvassa 20 CASMO5-vakioilla laskettuna. Erojen yksikkö on prosenttiyksikkö. Esimerkiksi CASMO5-vakioilla suurin ero nipputehoissa saadaan jakson alussa energialla 29 FPD ja ero on -4,186 prosenttiyksikköä, jolloin siis absoluuttisesti teoreettinen nipputeho on 0,04186 pienempi kuin mitattu. Muistutetaan, että suhteellinen nipputeho kertoo nipputehon ja keskimääräisen nipputehon suhteen. Keskimääräinen nipputeho saadaan yksinkertaisesti jakamalla reaktorin nimellinen lämpöteho 1500 MW polttoainennippujen lukumäärällä 313 eli keskimääräinen nipputeho on noin 4,8 MW. Esitetyt nipputehoerot ovat sydämen keskiarvoisia nipputeho-eroja 30 asteen symmetriasektorissa, missä mitatuissa nipputehoissa on mukana korjauskerroin (ks. luku 5.4.2). Jatkeissa ei ole lämpötilamittausta, joka tarvitaan mitatun nipputehon selvittämiseen. Tämän vuoksi nipputehoeroja ei ole määritetty jatkeille, ja ne on esitetty kuvissa 19 ja 20 valkoisella värillä. Kuvassa 21 on esitetty suhteellisten nipputeho-erojen

neliölliset keskiarvot prosenttiyksiköissä tuotetun energian funktiona. Neliölliset keskiarvot on laskettu täyden sydämen teoreettisista ja mitatuista suhteellisista nipputehoista. Jakson 43 latauskaavio ja nippujen iät ovat nähtävissä viitteen (Kuopanportti ja Hyvönen, 2019) liitteessä 2.

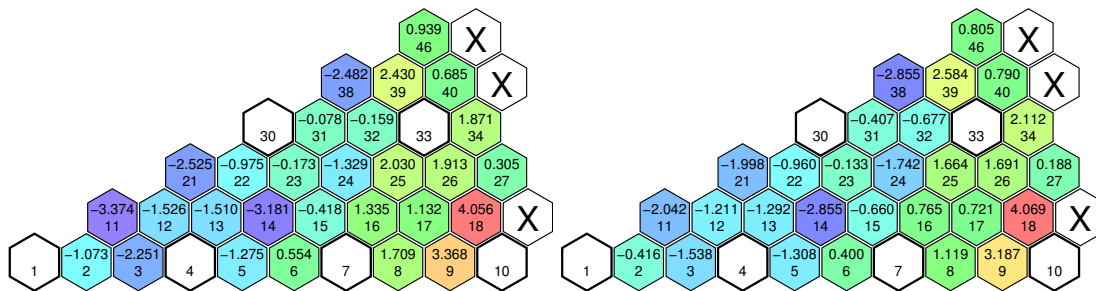
Kuvista 19 ja 20 havaitaan, että molemmilla CASMO-vakioilla jakson aikainen teoreettinen nipputeho on pienempi kuin mitattu sydämen keskellä. Paikoissa, joissa on tuore nippu eli paikoissa 11, 14 ja 21 ero on selvästi korostunut. Lisäksi myös toisen vuoden nipussa lähempänä sydämen reunaa paikassa 38 teoreettinen nipputeho on pienempi. Tätä vastoin lähempänä sydämen reunaa teoreettiset nipputehot ovat suurempia molemmilla CASMO-vakioilla. Lähellä sydämen reunaa korostuu selvästi ainoastaan paikan 18 tuore nippu, jossa teoreettinen nipputeho on selkeästi suurempi kuin mitattu. CASMO-vakioilla lasketuissa teoreettisissa nipputehoissa toistuu sama ilmiö, joka on havaittu myös tasapainolatausvertailussa luvussa 6.3.3. Tasapainolatausvertailun perusteella nipputehot ovat tuoreissa nipuissa CASMO5-vakioilla pienemmät ja vanhemmissa nipuissa pääsääntöisesti suuremmat kuin CASMO-4E-vakioilla. Tämä havaitaan esimerkiksi edellä mainituissa tuoreiden nippujen paikoissa 11, 14 ja 21, joissa CASMO5-vakioilla nipputeho on pienempi verrattuna CASMO-4E-vakioihin ja siten myös ero mitattuun nipputehoon on suurempi. Lisäksi tämä johtaa myös siihen, että paikan 18 tuoreessa nipussa CASMO5-vakioilla teoreettinen teho on lähempänä mitattua. Toisaalta esimerkiksi sydämen keskiosan kolmannen vuoden nipuissa CASMO5-vakioilla nipputeho on suurempi kuin CASMO-4E-vakioilla, jolloin nipputehot ovat lähempänä mittauksia.

Kuvan 21 nipputeho-erojen neliöllisten keskiarvojen perusteella, CASMO5-vakioilla teoreettiset nipputehot ovat lähempänä mitattuja, kun energiaa on tuotettu enemmän kuin 100 FPD. Tätä ennen CASMO-4E-vakioilla lasketut nipputehot ovat lähempänä mittauksia. Suurin ero nipputeho-erojen neliöllisessä keskiarvossa CASMO-vakioiden välillä on noin 0,2 prosenttiyksikköä jakson alussa ja noin jakson puolessa välissä. Pääosin molemmilla CASMO-vakioilla erot mittauksiin ovat luvussa 5.4.2 määritetyn mitatun tehon 3 % epävarmuuden sisällä. Tässä luvussa esitettyjen tulosten perusteella CASMO5-vakioilla teoreettinen tehojakauma saadaan ennustettua samalla tai hieman paremmalla tarkkuudella kuin CASMO-4E-vakioilla, joten CASMO5-ohjelman tuotantokäytölle ei ole tehojakaumien ennustamisen suhteen esteitä.



(a) 29 FPD

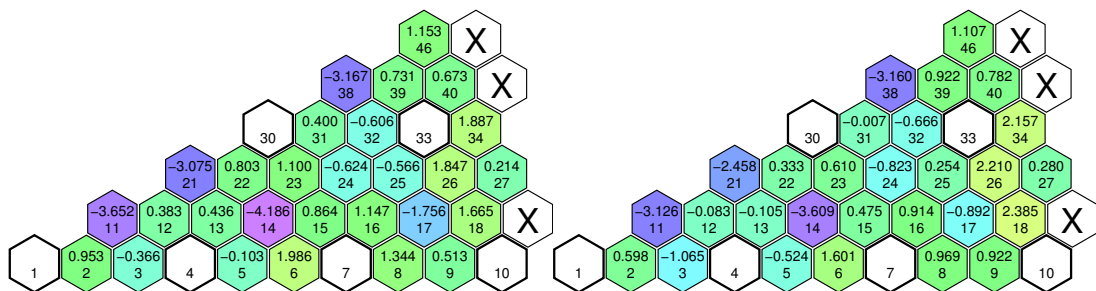
(b) 99 FPD



(c) 148 FPD

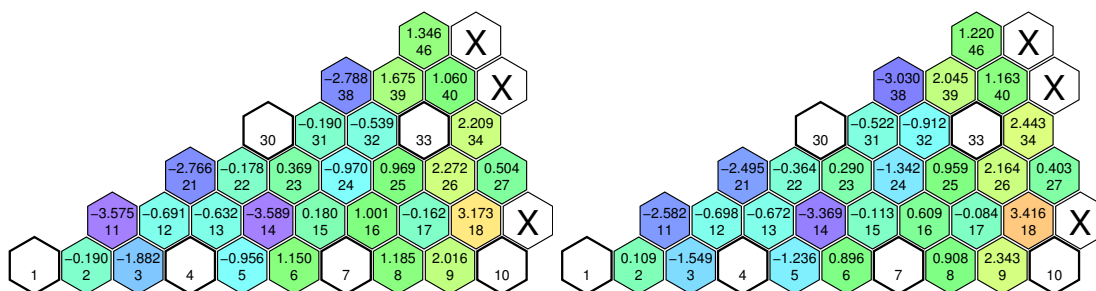
(d) 274 FPD

Kuva 19. Teoreettisen suhteellisen nipputehojakauman poikkeama verrattuna mitattuun nipputehojakaumaan %-yksiköissä Loviisa-1:n jakson 43 eri energioilla (teoreettinen - mitattu, CASMO-4E-vakioilla).



(a) 29 FPD

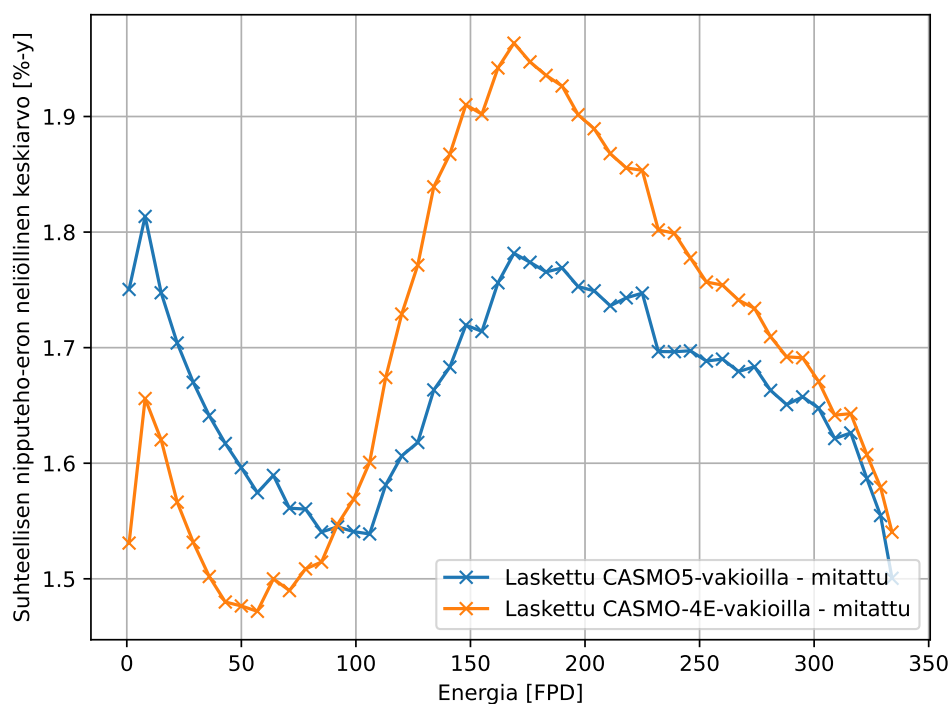
(b) 99 FPD



(c) 148 FPD

(d) 274 FPD

Kuva 20. Teoreettisen suhteellisen nipputehojakauman poikkeama verrattuna mitattuun nipputehojakaumaan %-yksiköissä Loviisa-1:n jakson 43 eri energioilla (teoreettinen - mitattu, CASMO5-vakioilla).

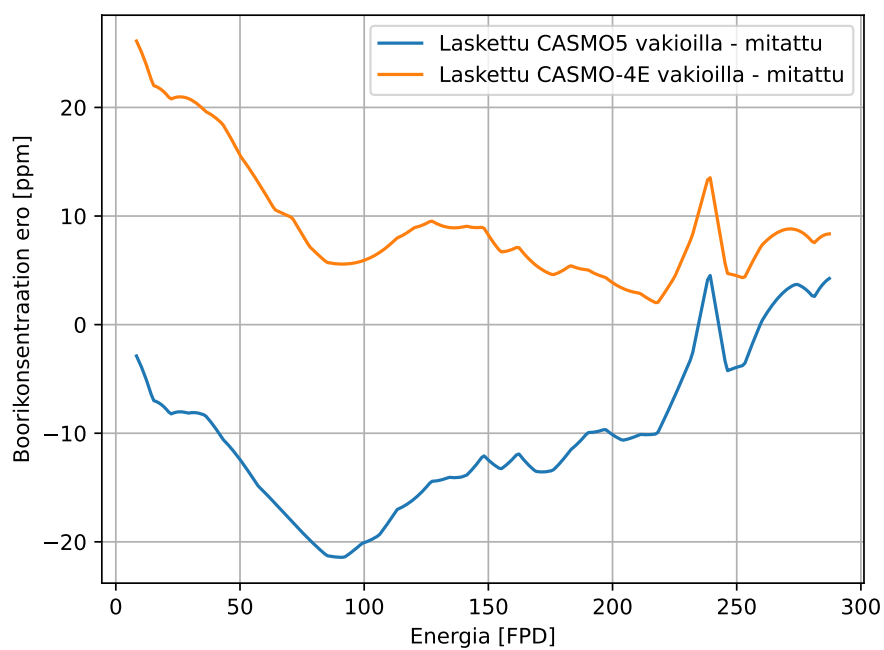


Kuva 21. Suhteellisen nipputeho-eron neliöllinen keskiarvo %-yksiköissä tuotetun energian funktiona jaksolla 43 (teoreettinen - mitattu).

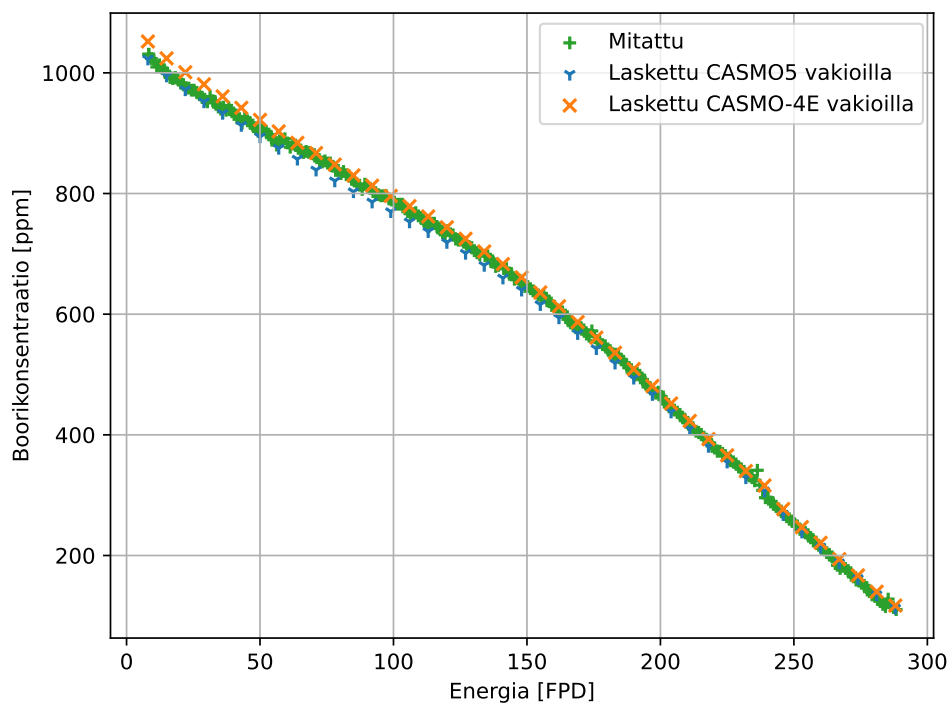
6.4.2 Kriittisen boorikonsentraation vertailu mittauksiin

Mitatun kriittisen boorikonsentraation ero offline-RESU-98:ssa laskettuun kriittiseen boorikonsentraatioon sekä CASMO5- että CASMO-4E-vakioilla on esitetty kuvassa 22 Loviisa-1 jaksolle 43. Mitattu ja laskettu boorikonsentraatio on poimittu eri aikoina erilaisella taajuudella, joten kuvan 22 muodostamisessa on käytetty dataan asetettuja sovitteita. Sovitteet perustuvat kuvassa 23 esitettyyn diskreettiin dataan, jossa sydämen laskettu ja mitattu kriittinen boorikonsentraatio on esitetty tuotetun energian funktiona. Kriittisen boorikonsentraation mittausero on kerätty päivittäin ja laskettu arvo viikoittain.

CASMO5:n avulla kriittisen boorikonsentraation ennustustarkkuus on yleisesti samaa luokkaa kuin CASMO-4E:llä. CASMO5:n avulla kriittinen boorikonsentraatio ennustetaan tarkemmin jakson alussa ja CASMO-4E:n avulla tarkemmin, kun noin kolmasosa jaksosta on kulunut. Maksimipoikkeaman itseisarvo on CASMO5:n avulla hieman pienempi noin 20 ppm. CASMO5:n avulla ennustettua kriittistä boorikonsentraatiota voidaan pitää tässä luvussa esitetyn perusteella riittävän tarkkana tuotantokäyttöön.



Kuva 22. Mitatun ja lasketun kriittisen boorikonsentraation erot tuotetun energian funktiona Loviisa-1 jaksolla 43.



Kuva 23. Mitattu ja laskettu kriittinen boorikonsentraatio Loviisa-1 jaksolla 43.

7 Johtopäätökset

Validointimenetelmien tulosten perusteella CASMO5-koppipalamaohjelma soveltuu tuotantokäyttöön Loviisan voimalaitoksen lataussuunnittelussa sekä reaktorivalvonnassa käytettyihin laskentajärjestelmiin. CASMO5:llä kyetään jälkikäsitteilyn avulla luomaan kaikki nodaaliohjelma HEXBU-3D:n ja sauvatehojen rekonstruktio-ohjelman ELSI-1440:n vaatimat laskennassa käytetyt parametrit ja luotujen parametrien avulla sydänsimulointi voidaan tehdä riittävän laadukkaasti. CASMO5:llä tuotetut diffuusioparametrit tekevät tässä työssä käytetyillä polttoaineilla sydäimestä reaktiivisemmän. CASMO5-vakioille käytettävä reaktiivisuuden tasokorjaus tulee siis mitoitaa uudestaan.

Sydäntason simulointituloksissa ei synny suuria muutoksia CASMO5-ohjelmaa käytettäessä verrattuna nykyisin tuotantokäytössä olevaan CASMO-4E-ohjelmaan. Huomionarvoisina eroina mainitaan sydämen hieman tasaisemmat tehojakaumat, suuremmat termiset nousuvarat, itseisarvoisesti suuremmat reaktiivisuuskertoimet, parempi kriittisen boorikonsentraation ennustus jakson alussa sekä nipputehojen ennustus jakson alun jälkeen. Lisäksi tasapainolataus- ja mittausvertailujen perusteella havaittiin, että CASMO5-ohjelmalla tuoreet niput tuottavat vähemmän tehoa ja pidempään säteilytetyt niput enemmän tehoa kuin CASMO-4E-ohjelmaa käytettäessä. Ennustettu kriittinen boorikonsentraatio tulee todennäköisesti poikkeamaan hieman mitatusta boorikonsentraatiosta CASMO5-ohjelmalla, mutta jakson alun boorikonsentraatio saadaan luultavasti ennustettua nykyistä paremmin. Tämä on hyvä jakson alun fysikaalisten kokeiden kannalta.

Työn päätavoite oli varmistaa, että uusi koppipalamaohjelma CASMO5 soveltuu Loviisan voimalaitoksen laskentajärjestelmiin. Tämä tavoite voidaan katsoa pääosin täytetyksi työn tulosten perusteella. Jatkossa tullaan varmistamaan CASMO5-ohjelman soveltuvuus SPND-anturien tulkintamallissa, turvallisuusanalyseissä käytettävien laaja-alaisten MOD6-vaikutusalojen laskennassa sekä mm. jälkilämpötehojen laskennassa käytetyssä SNF-ohjelmassa.

8 Yhteenveto

Tässä työssä on tehty CASMO5-koppipalamaohjelman validointi Loviisan voimalaitoksen lataussuunnittelussa ja reaktorivalvonnassa käytettyihin laskentajärjestelmiin. Työssä esitettiin tiivistetyt kuvaukset tärkeimmistä laskentaohjelmista sekä koppipalamaohjelman datalle tehdystä jälkikäsitteystä. Jälkikäsitteilyohjelmien avulla tehty tiedonsiirto CASMO-ohjelman laskentatulosten ja sydänsimuloinnissa käytettyjen ohjelmien syöte-tiedostojen välillä kuvattiin mahdollisimman tarkasti, jotta jälkikäsitteilyohjelmiin tehtävät muutokset voitiin perustella. Jälkikäsitteilyohjelmaan tehdyt muutokset CASMO5-ohjelmaa varten olivat pieniä, mutta erittäin tarpeellisia. Tuloverailun perusteella jälkikäsitteilyohjelmiin tehdyt muutokset voitiin katsoa onnistuneeksi. Myös CASMO-ohjelman syötetiedostoon tehdyt muutokset kuvattiin, kun käytössä on CASMO5-ohjelma. Erityisesti syötetiedostoon tehdyistä muutoksista voidaan mainita menetelmä, jolla tässä työssä käytetyn CASMO5-version havaittu polttoaineen Nb-93-nuklidin atomitiheyden nollautuminen saadaan estettyä: tuotantokäytössä ei-polttoainealueiden nuklideja ei aseteta palamaan.

Validointimenetelmiä CASMO5:lle oli yhteensä neljä: vertailu Serpent 2 -ohjelman tuloksiin, jälkikäsitteilyn tuloksena syntyvien parametrien vertailu, tasapainolatauslaskennassa syntyvien puhtaasti teoreettisten reaktorifysikaalisten ominaisuuksien vertailu ja viimeisenä vertailu todellisesta jaksosta kerättyihin mittauksiin. Tulosten perusteella CASMO5 toimii hyvin ja sillä päästiin vähintään samaan tarkkuuteen kuin CASMO-4E-ohjelmalla. Sydäntason laskennassa syntyneet erot koppipalamaohjelmien välillä olivat pieniä, mutta yleisesti muutokset tapahtuivat lataussuunnittelun kannalta edullisempaan suuntaan CASMO5-ohjelmalla. Esimerkiksi sydämen tehojakaumat tulivat tasaisemmiksi ja termiset nousuvarat kasvoivat.

Tulevaisuudessa CASMO5-ohjelman validointi tullaan tekemään lopuille Loviisan voimalaitoksen laskentajärjestelmille, jotka hyödyntävät koppipalamaohjelmaa. Tässä työssä tehdyn validoinnin perusteella CASMO-4E voidaan kuitenkin korvata CASMO5:llä sekä lataussuunnittelussa että reaktorivalvonnassa.

Lähteet

Antila, M. (1999). *RESU-98 L01&2 reaktorin suoritusarvolaskennan yleiskuvaus*. Fortum Engineering Oy.

Anttila, M. (1998). *CAXMAN and related postprocessing codes. A provisional procedure to generate two-group diffusion parameters and fitting coefficients for HEXBU/ELSI calculations with the hexagonal version of the CASMO-4 fuel assembly burnup program*. Tekninen raportti. VTT Technical Research Centre of Finland.

Anttila, M., Kaloinen, E. ja Leppänen, J. (2004). *Loviisan ydinreaktorien laskentajärjestelmän kehittäminen*. Tekninen raportti. VTT Technical Research Centre of Finland.

Bell, G. I. ja Glasstone, S. (1970). *Nuclear reactor theory*. Tekninen raportti. US Atomic Energy Commission, Washington, DC (United States).

Brown, F. B. (2006). ”On the use of Shannon entropy of the fission distribution for assessing convergence of Monte Carlo criticality calculations”. Teoksessa: *ANS topical meeting on reactor physics (PHYSOR 2006)*. Canadian Nuclear Society, Canada.

Chadwick, M. B. et al. (2011). ”ENDF/B-VII. 1 nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data”. *Nuclear data sheets* 112.12, s. 2887–2996.

Ferrer, R., Rhodes, J. ja Smith, K. (2012). ”Linear source approximation in CASMO5”. *Proc. Advances in Reactor Physics (PHYSOR 2012)*, s. 15–20.

Haugh, B. ja Ferrer, R. (2015). ”CASMO5 PWR Methods and Validation Report”. *Studs-
vik Scandpower Report SSP-14-P01/012-R Rev 1*.

Hykes, J., Ferrer, R. ja Rhodes, J. (2022a). *CASMO5 A Fuel Assembly Burnup Program Methodology Manual, SSP-08/405 Rev 17*. Studsvik Scandpower, Inc.

Hykes, J., Ferrer, R. ja Rhodes, J. (2022b). *CASMO5 A Fuel Assembly Burnup Program User’s Manual, SSP-07/431 Rev 22*. Studsvik Scandpower, Inc.

Kaloinen, E. (1992). *HEXBU-3D/MOD5, a new version of the HEXBU-3D code*. Tekninen raportti. VTT Technical Research Centre of Finland.

Kaloinen, E. (1993). *Calculation of flux discontinuity factors for HEXBU-3D*. Tekninen raportti. VTT Technical Research Centre of Finland.

Kaloinen, E. (2006). *CRFIT7&8, Codes for creation of input file of two-group diffusion parameters and fitting coefficients for HEXBU-3D/MOD5, HEXTRAN and TRAB-3D*. Tekninen raportti. VTT Technical Research Centre of Finland.

Kaloinen, E., Teräsvirta, R. ja Siltanen, P. (1981). *HEXBU-3D, a three-dimensional PWR-simulator program for hexagonal fuel assemblies*. VTT Technical Research Centre of Finland. ISBN: 951-38-1254-5.

Knott, D. ja Yamamoto, A. (2010). "Lattice physics computations". Teoksessa: *Handbook of nuclear engineering*. ISBN: 978-0-387-98130-7.

Koning, A. et al. (2019). "TENDL: complete nuclear data library for innovative nuclear science and technology". *Nuclear Data Sheets* 155, s. 1–55.

Kuopanportti, J. (2012). "Development of an automatic loading pattern optimization tool for Loviisa VVER-440 reactors". Diplomityö, Aalto-yliopisto.

Kuopanportti, J. (2015). *Reaktorin teoreettisen tehojakauman laskentatarkkuus 2. sukupolven Gd-polttoaineella*. Fortum Power and Heat Oy.

Kuopanportti, J. (2017). *Reaktorin tehon käyttäytyminen venytysajossa Gd-polttoaineen nelierälatauksilla*. Fortum Power and Heat Oy.

Kuopanportti, J. (2019). *HEXBU-3D/MOD5.3.0 -ohjelmassa polttoaineelle sovellettavan jatkekuvauksen mallinnusvirheen tutkiminen*. Fortum Power and Heat Oy.

Kuopanportti, J. (2020a). *FSAR 4.4 Lämpö- ja virtaustekninen suunnittelu*. Fortum Power and Heat Oy.

Kuopanportti, J. (2020b). *Reaktorin suoritusarvolaskennan paneelivakiot*. Fortum Power and Heat Oy.

Kuopanportti, J. (2021). *Sydämen lähtölämpötilojen tulkinta tehoksi*. Fortum Power and Heat Oy.

Kuopanportti, J. (2022a). *DUMMY-projekti, Suojaelementtien lukumäärän kasvattamisen yhteydessä tehtävien RESU-98-muutosten validointi*. Fortum Power and Heat Oy.

Kuopanportti, J. (2022b). *Optimoidun polttoaineen nipputyypin 143427 ryhmävakioiden laskenta*. Fortum Power and Heat Oy.

Kuopanportti, J. (2022c). *Polttoainelatausten suunnittelu*. Fortum Power and Heat Oy.

Kuopanportti, J. ja Hyvönen, O. (2019). *Lataus "LO1-43A" LO1 43. polttoainelatauksen reaktorifysikaaliset ominaisuudet ja polttoaineen käyttäytyminen*. Fortum Power and Heat Oy.

Kuusisto, J. (1997). *ELSI-1440, a two dimensional pinpower program for hexagonal fuel assemblies*. IVO Power Engineering Ltd.

Kuusisto, J. (2002a). *RESU98 SPND-tulkintamalli*. Fortum Nuclear Services Oy.

Kuusisto, J. (2002b). *Sekoittumismalli ja TC-tulkintamalli*. Fortum Nuclear Services Oy.

Kuusisto, J. (2003). *LOVIISA-1 & 2 PTK-reaktiivisuusmittari*. Fortum Nuclear Services Oy.

Kuusisto, J. (2004). *BNFL-nippu, sekoittumismallin parametrit*. Fortum Power ja Heat Oy.

Kuusisto, J. (2007). *Integrated program package HEXBU-ELSI for VVER fuel management calculations*. IVO Power Engineering Ltd.

Lamarsh, J. R. ja Baratta, A. J. (2001). *Introduction to nuclear engineering*. Vol. 3. Prentice hall Upper Saddle River, NJ. ISBN: 978-0201824988.

Lee, D., Smith, K. ja Rhodes, J. (2009). "The impact of ^{238}U resonance elastic scattering approximations on thermal reactor Doppler reactivity". *Annals of Nuclear Energy* 36.3, s. 274–280.

Lehtinen, I.-V. ja Kekkonen, L. (2023). *FSAR 4.2 Polttoaine*. Fortum Power and Heat Oy.

Leppänen, J. (2015). *Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, user's manual*.

Leppänen, J., Pusa, M., Viitanen, T., Valtavirta, V. ja Kaltiaisenaho, T. (2015). "The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013". *Annals of Nuclear Energy* 82, s. 142–150.

Leppänen, R. (2021). "Reaktiivisuustransienttien hallinnan kehittäminen Loviisan ydinvoimalaitokselle". Diplomityö, Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT.

MacFarlane, R. E. ja Muir, D. W. (1994). *The NJOY nuclear data processing system version 91*. Tekninen raportti LA-12740-M. Los Alamos National Lab., NM (United States).

Muir, D., Boicourt, R. ja Kahler, A. (2012). "The NJOY nuclear data processing system, version 2012". *Los Alamos, USA: Los Alamos National Laboratory LA-UR-12-27079*.

Pusa, M. (2011). "Rational approximations to the matrix exponential in burnup calculations". *Nuclear science and engineering* 169.2, s. 155–167.

Pyykkö, P. (2023). *FSAR 7.6.1 Ydintekninen instrumentointi*. Fortum Power and Heat Oy.

Rantamäki, K. ja Anttila, M. (2008). *Loviisan polttoaineiden reaktorifysikaalisten materiaalivakioiden laskentajärjestelmä*. Tekninen raportti. VTT Technical Research Centre of Finland.

Rhodes, J. ja Edenius, M. (2004). *CASMO-4 a fuel assembly burnup program user's Manual, SSP-01/400 Rev 4*. Studsvik Scandpower, Inc.

Rhodes, J., Smith, K. ja Edenius, M. (2004). *CASMO-4E Extended Capability CASMO-4E, SSP-01/401 Rev 2*. Studsvik Scandpower, Inc.

Rintala, A. (2016). *Input instructions for HEXBU-3D/MOD5.4 and MOD6.2*.

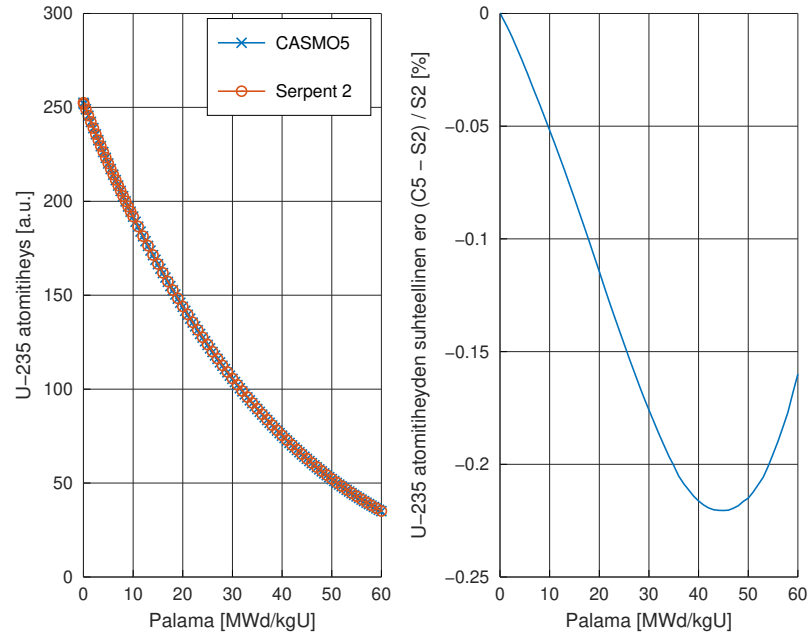
Shibata, K. et al. (2011). "JENDL-4.0: a new library for nuclear science and engineering". *Journal of Nuclear Science and Technology* 48.1, s. 1–30.

Siltanen, P. (1990). *HEXBU-3D: VVER reaktorisydämen 2-ryhmäinen ja 3-ulotteinen noodimalli*. Esitelmä. Imatran Voima Oy.

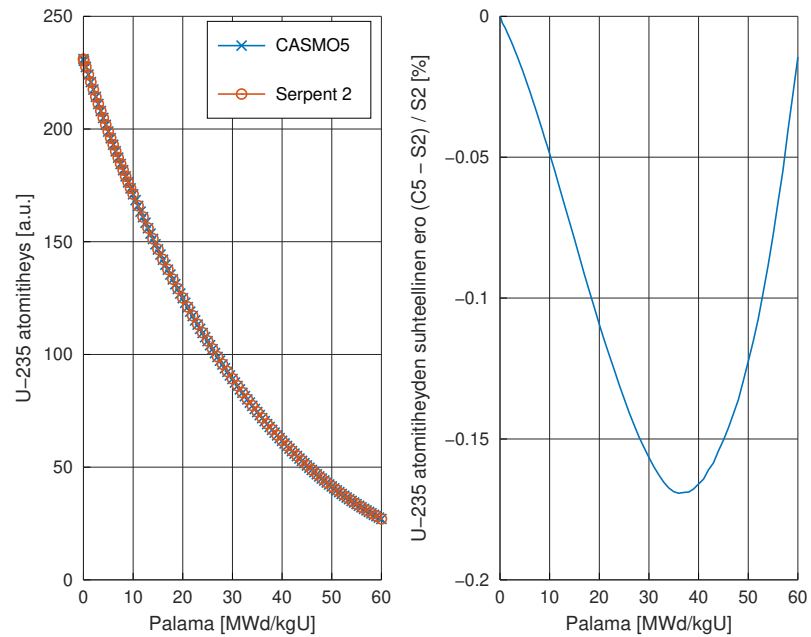
Valtavirta, V. ja Rintala, A. (2019). *Generation of updated radial albedos for the Loviisa reactor core with Serpent 2*. Tekninen raportti. VTT Technical Research Centre of Finland.

Vehmaanperä, S. (2020). *FSAR 4.3 Ydintekninen suunnittelu*. Fortum Power and Heat Oy.

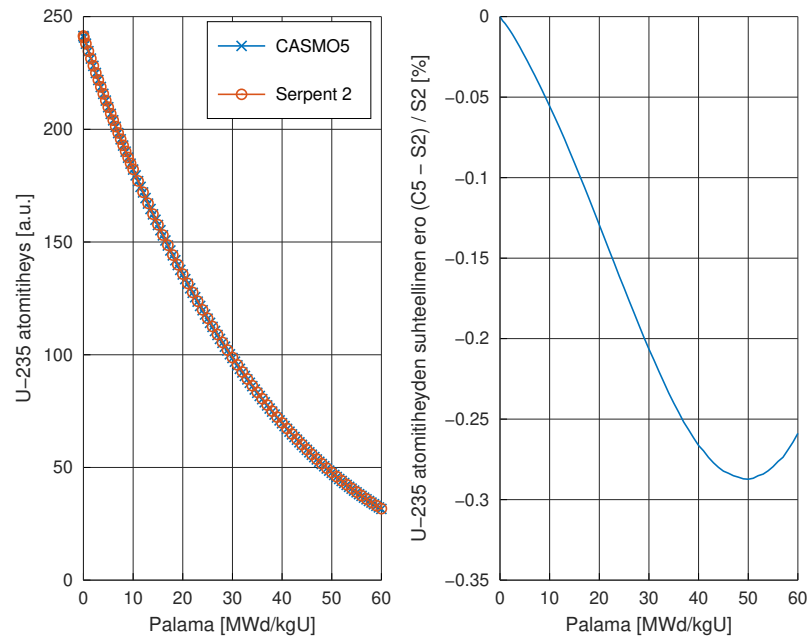
Liite 1. CASMO–Serpent-vertailun atomitiheystulokset



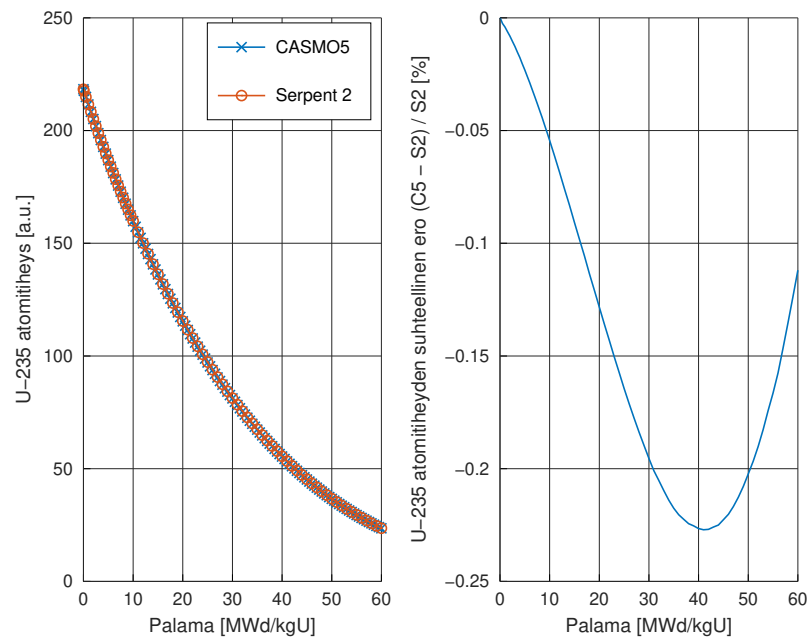
Kuva 24. CASMO5:n ja Serpent 2:n laskema U-235 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen A kiinteällä nipulla.



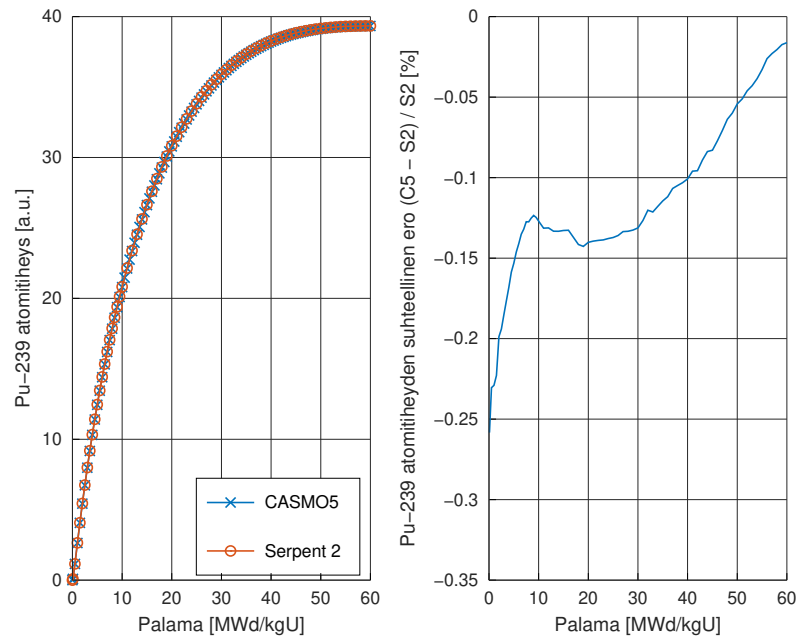
Kuva 25. CASMO5:n ja Serpent 2:n laskema U-235 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen A jatkeella.



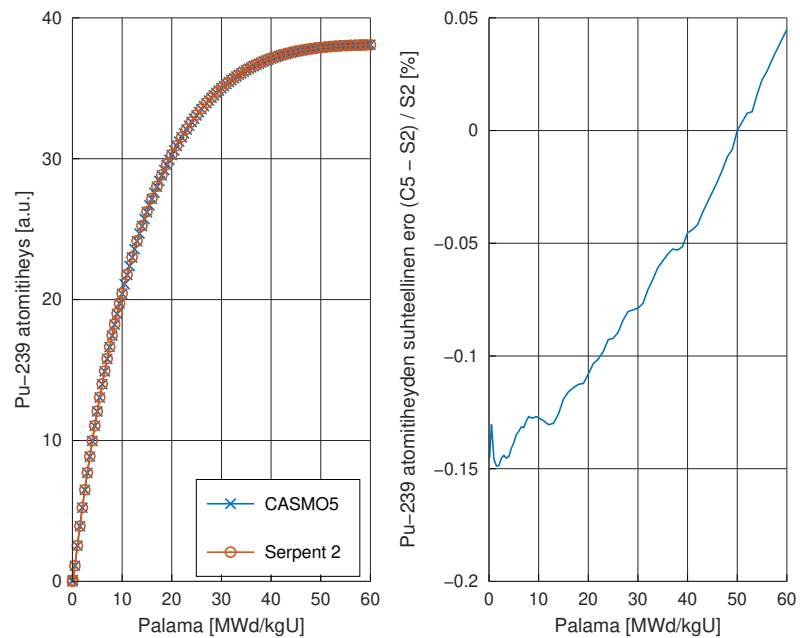
Kuva 26. CASMO5:n ja Serpent 2:n laskema U-235 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen B nipulla.



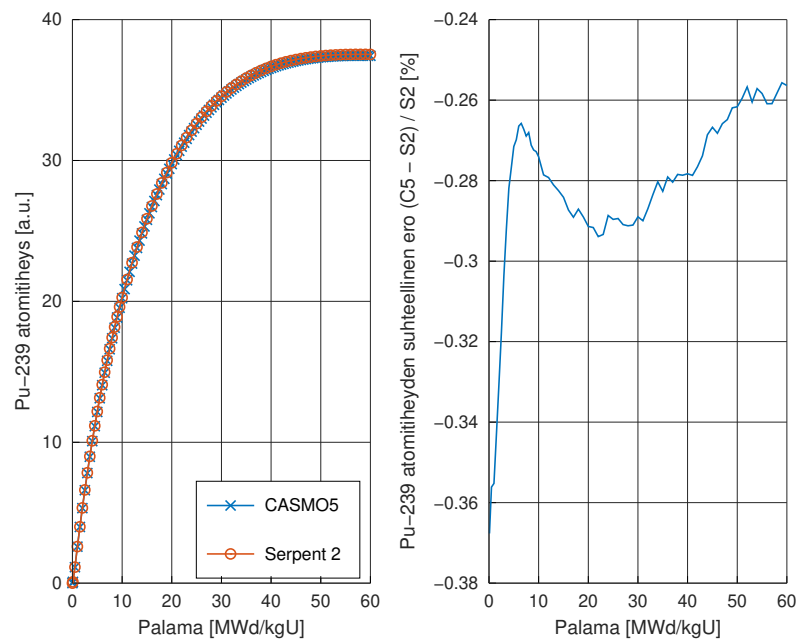
Kuva 27. CASMO5:n ja Serpent 2:n laskema U-235 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen B jatkeella.



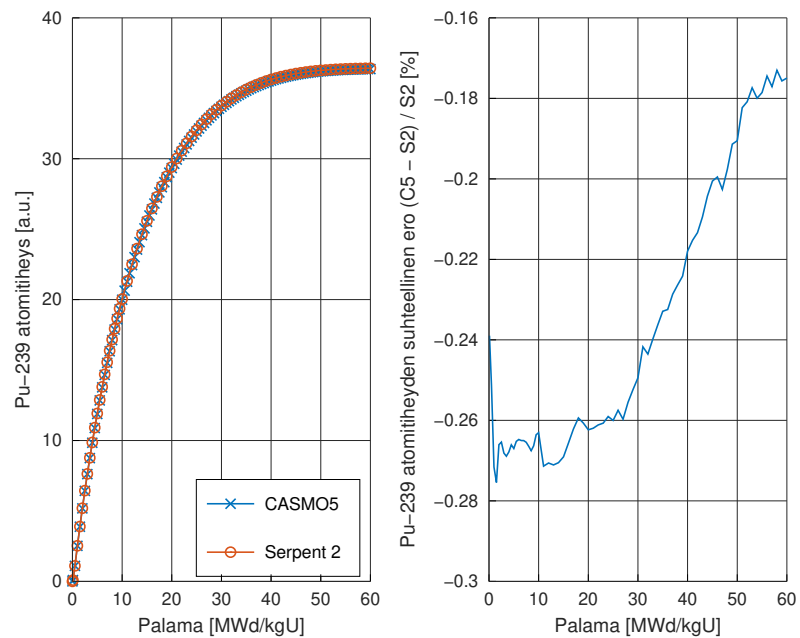
Kuva 28. CASMO5:n ja Serpent 2:n laskema Pu-239 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen A kiinteällä nipulla.



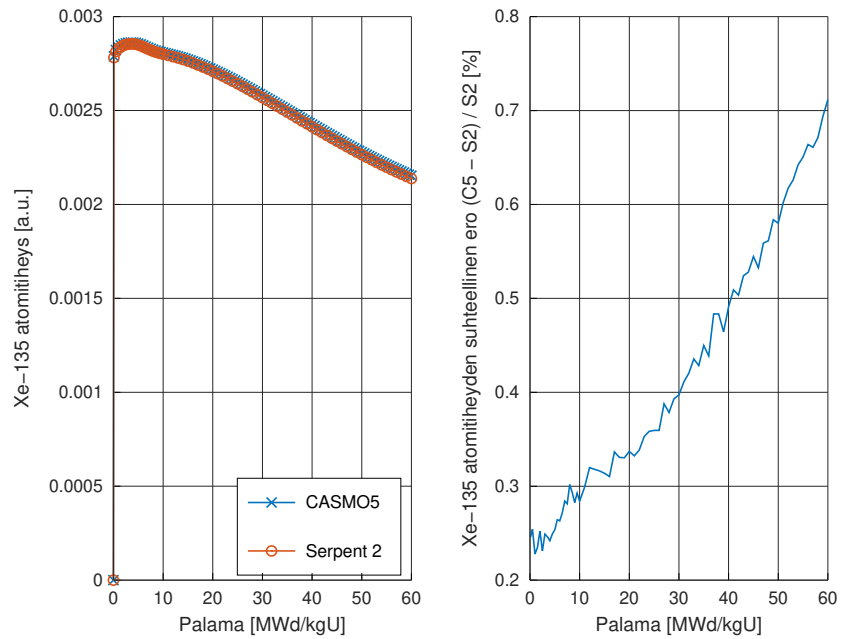
Kuva 29. CASMO5:n ja Serpent 2:n laskema Pu-239 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen A jatkeella.



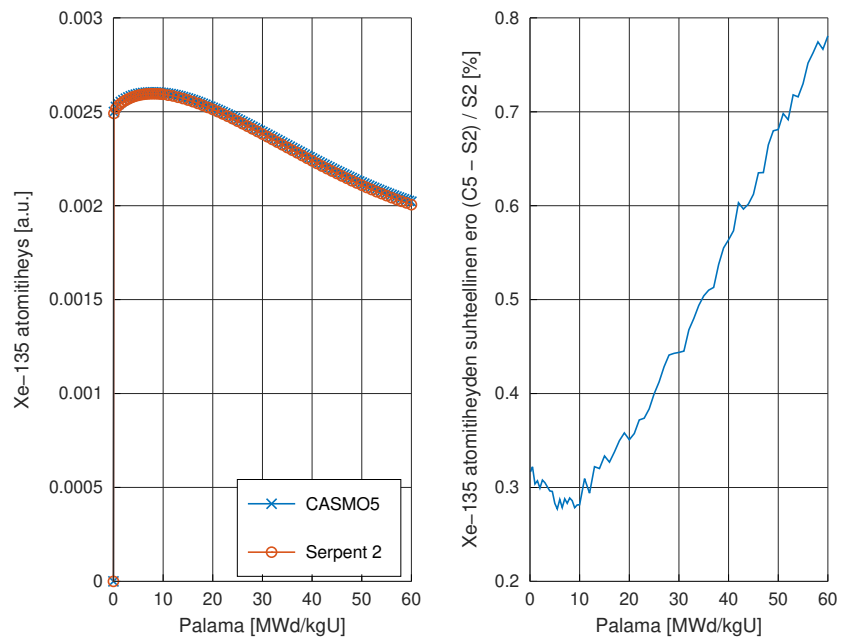
Kuva 30. CASMO5:n ja Serpent 2:n laskema Pu-239 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen B nipulla.



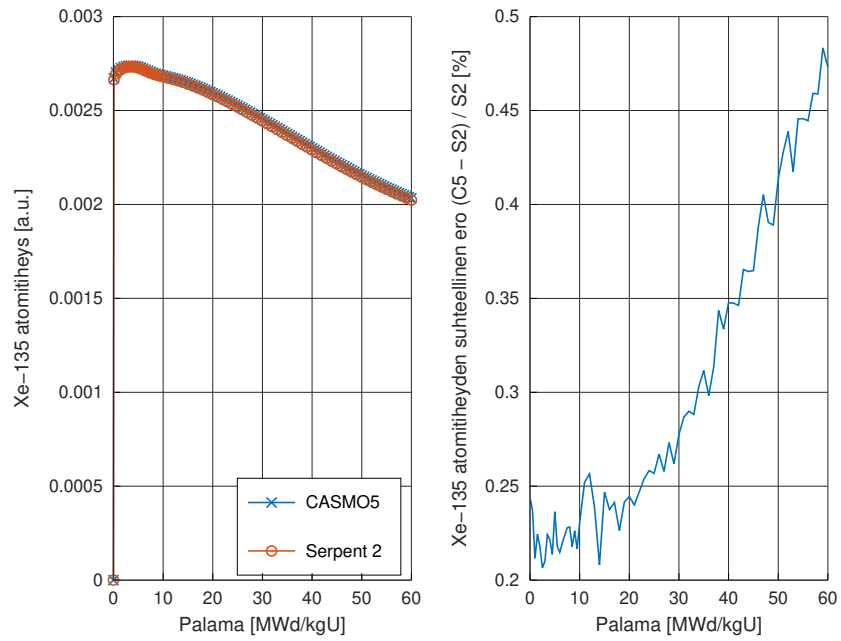
Kuva 31. CASMO5:n ja Serpent 2:n laskema Pu-239 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen B jatkeella.



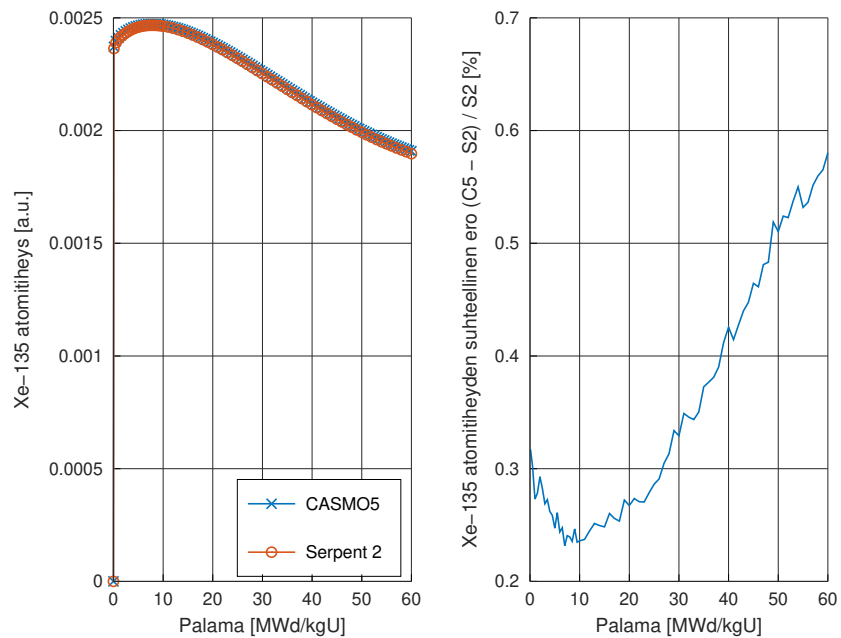
Kuva 32. CASMO5:n ja Serpent 2:n laskema Xe-135 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen A kiinteällä nipulla.



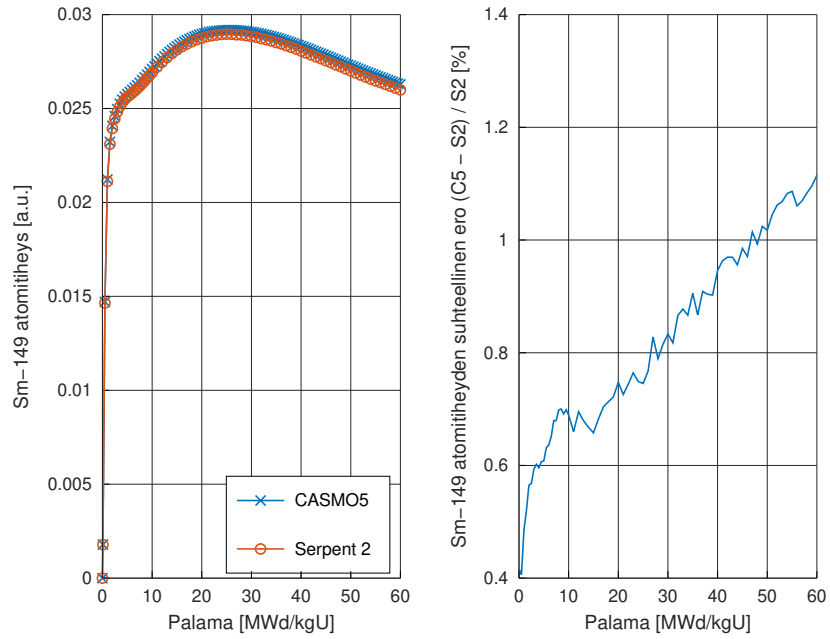
Kuva 33. CASMO5:n ja Serpent 2:n laskema Xe-135 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen A polttoaineen jatkeella.



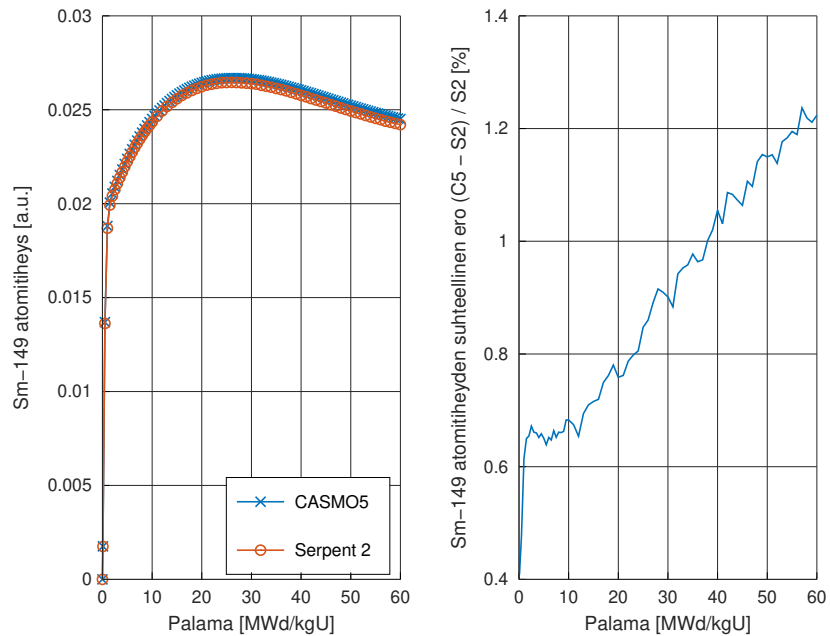
Kuva 34. CASMO5:n ja Serpent 2:n laskema Xe-135 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen B kiinteällä nipulla.



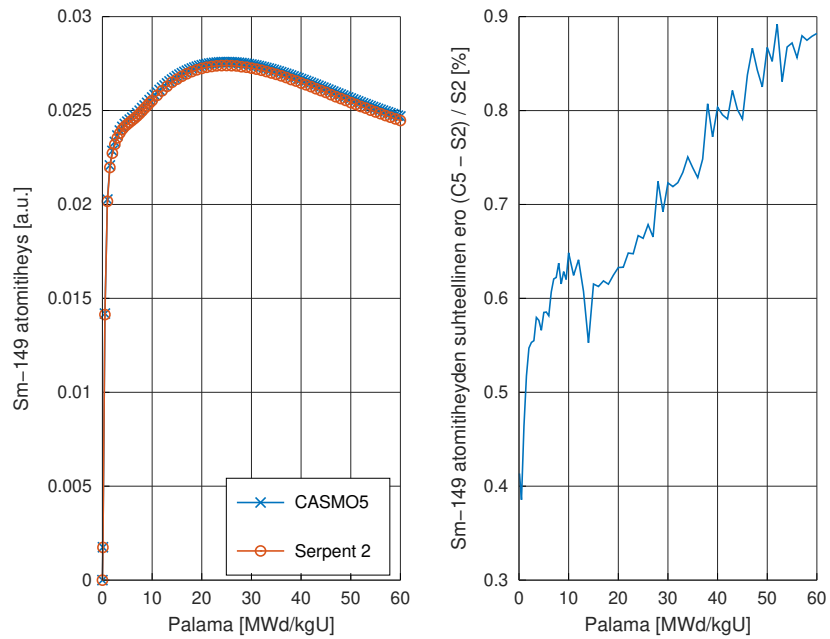
Kuva 35. CASMO5:n ja Serpent 2:n laskema Xe-135 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen B jatkeella.



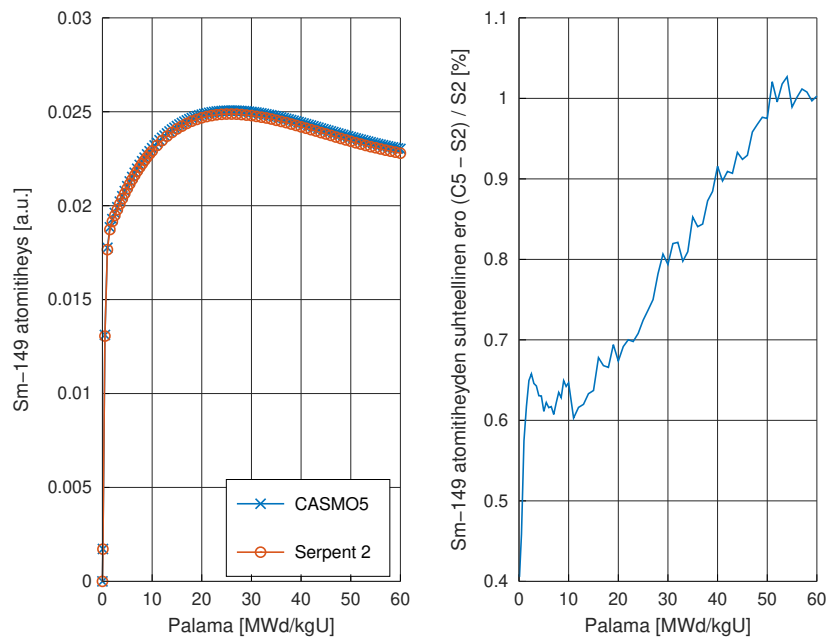
Kuva 36. CASMO5:n ja Serpent 2:n laskema Sm-149 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen A kiinteällä nipulla.



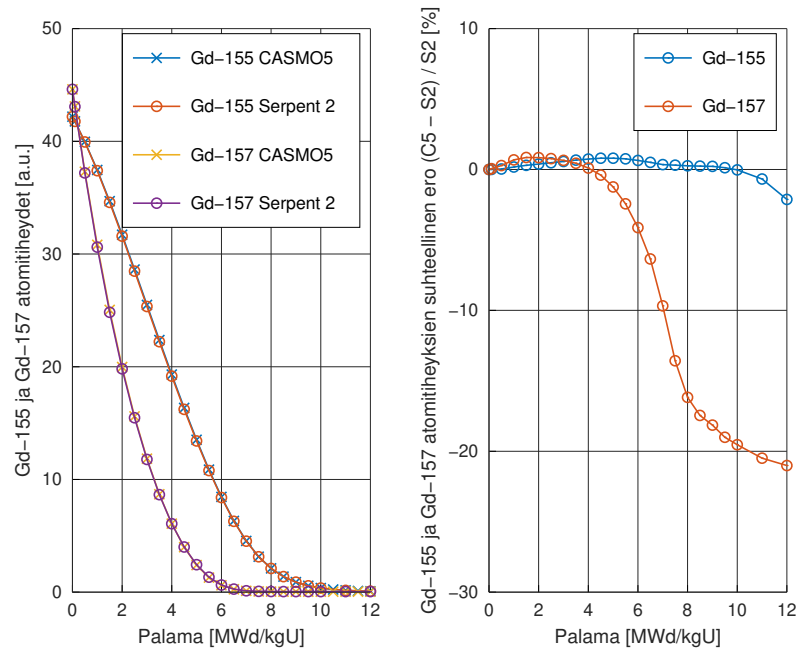
Kuva 37. CASMO5:n ja Serpent 2:n laskema Sm-149 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen A jatkeella.



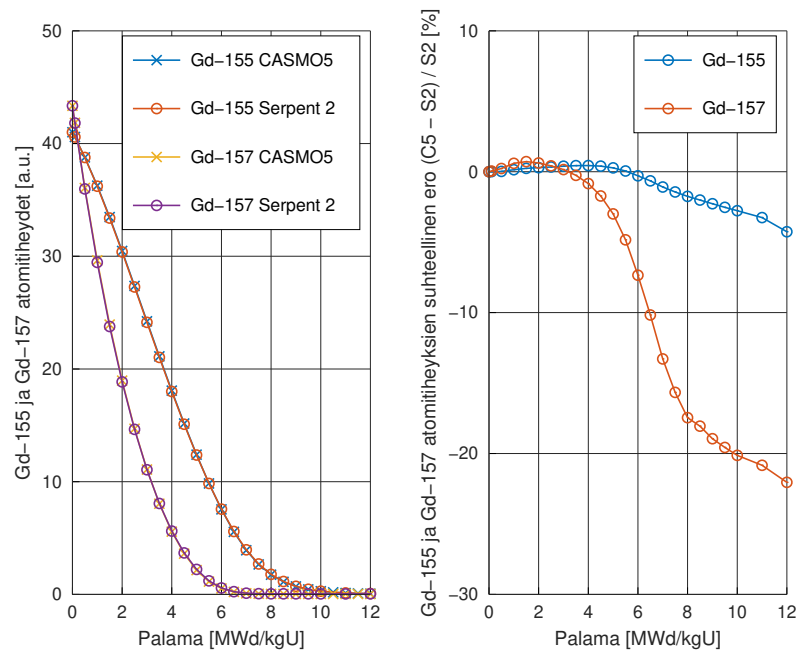
Kuva 38. CASMO5:n ja Serpent 2:n laskema Sm-149 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen B nipulla.



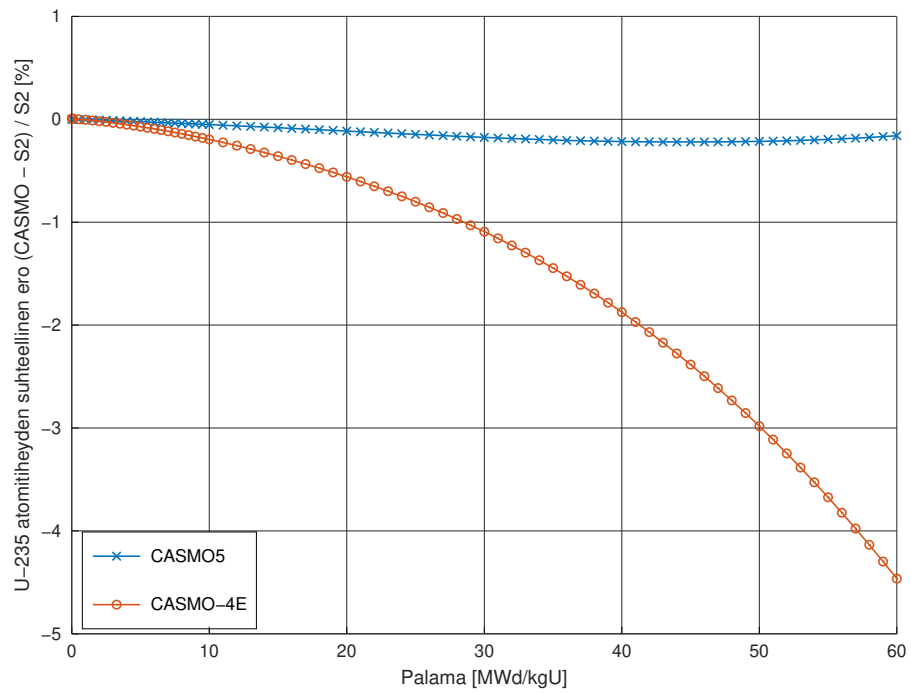
Kuva 39. CASMO5:n ja Serpent 2:n laskema Sm-149 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen B jatkeella.



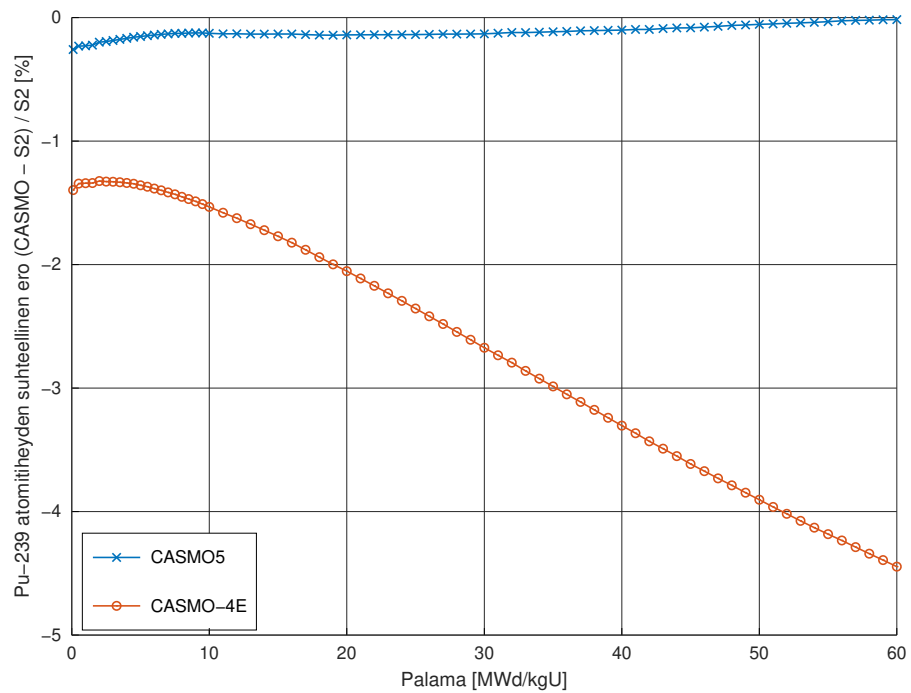
Kuva 40. CASMO5:n ja Serpent 2:n laskema Gd-155 ja Gd-157 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen A kiinteällä nipulla.



Kuva 41. CASMO5:n ja Serpent 2:n laskema Gd-155 ja Gd-157 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen B kiinteällä nipulla.

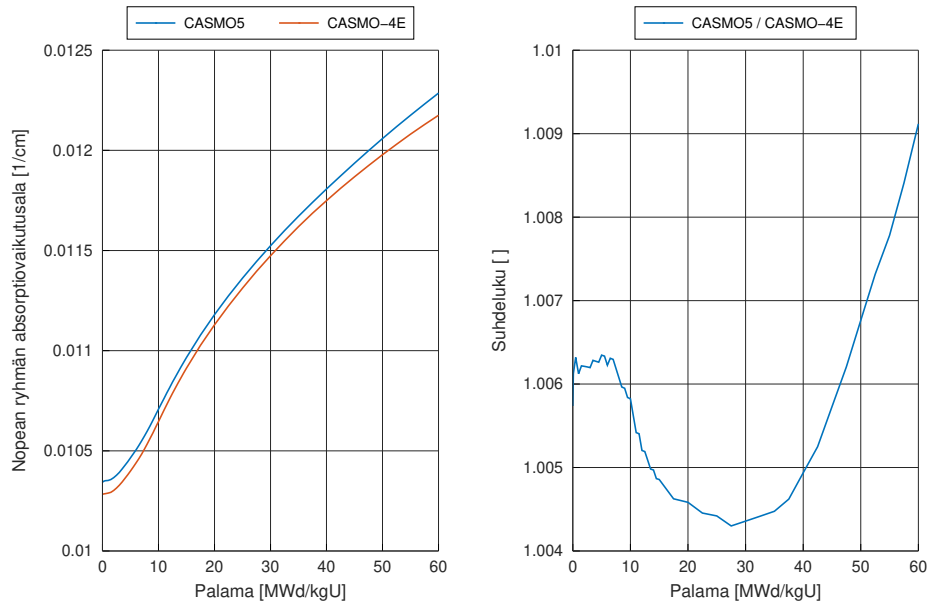


Kuva 42. CASMO-ohjelmien ja Serpent 2:n laskema U-235 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen A kiinteällä nipulla.

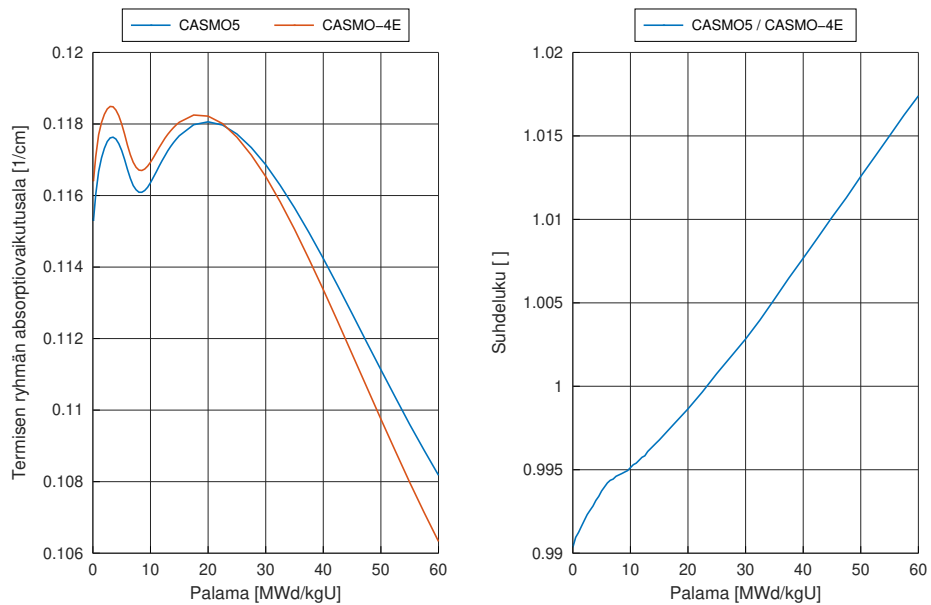


Kuva 43. CASMO-ohjelmien ja Serpent 2:n laskema Pu-239 keskimääräinen atomitiheys palaman funktiona polttoaineen A kiinteällä nipulla.

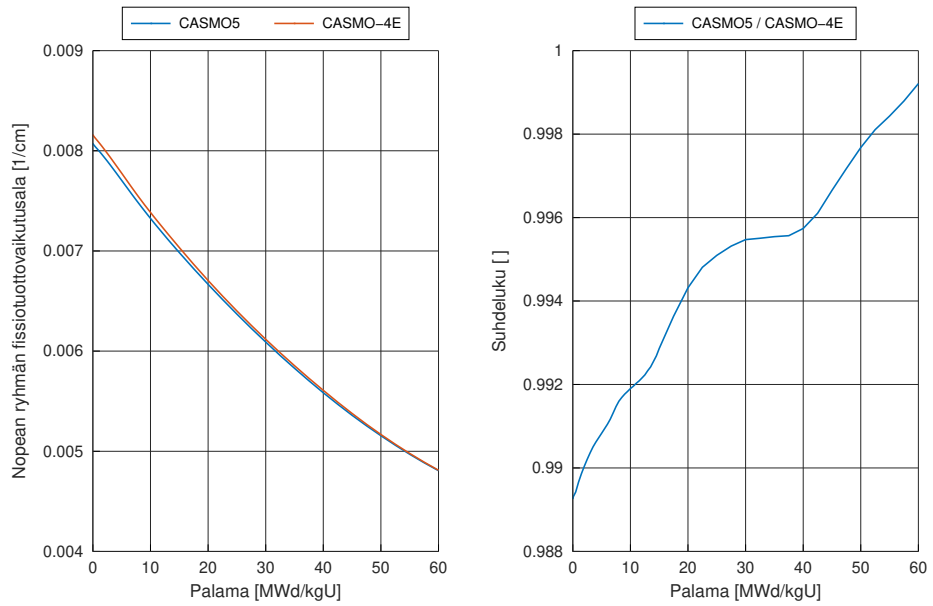
Liite 2. HEXBU-3D-ohjelmassa käytettyjen diffuusioparametrien vertailutulokset



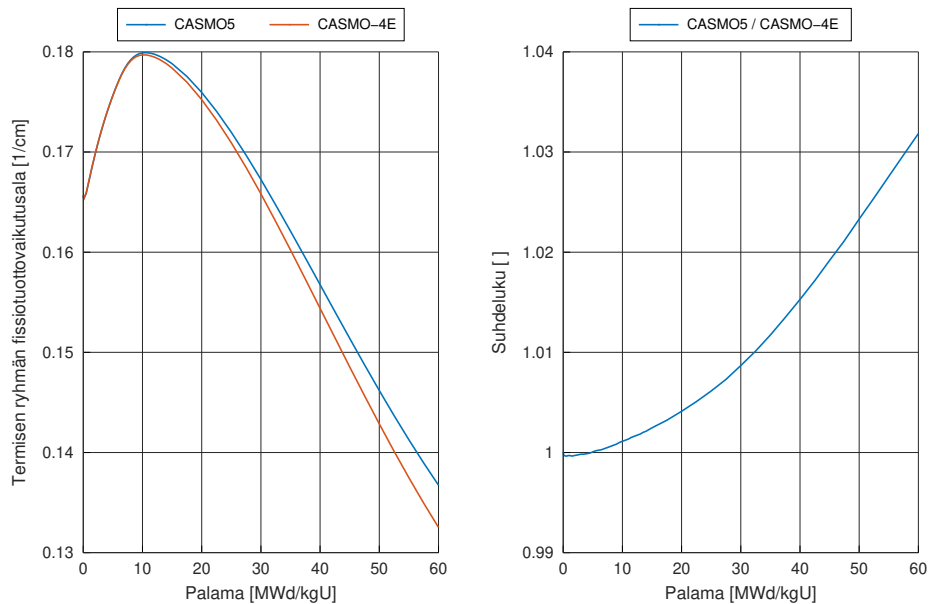
Kuva 44. Polttoaineen A kiinteän nipun nopean ryhmän absorptiovaikutusalojen erot, kun vaikutusalat on laskettu CASMO-ohjelmilla.



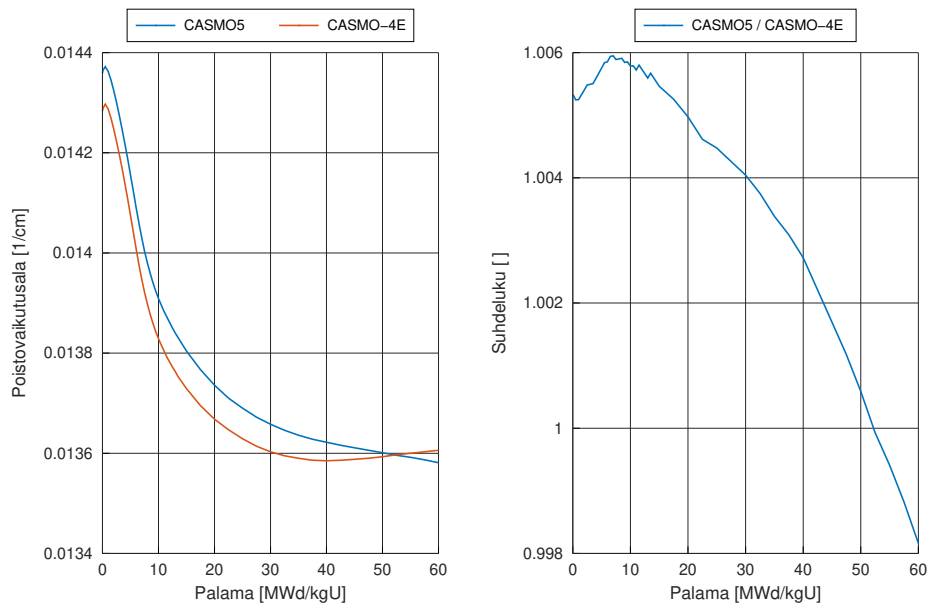
Kuva 45. Polttoaineen A kiinteän nipun termisen ryhmän absorptiovaikutusalojen erot, kun vaikutusalat on laskettu CASMO-ohjelmilla.



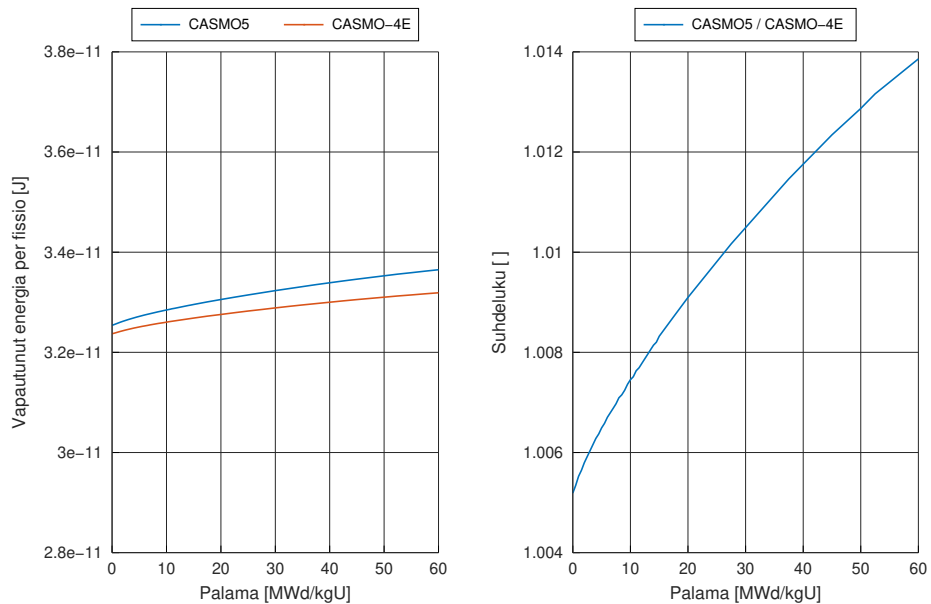
Kuva 46. Polttoaineen A kiinteän nipun nopean ryhmän fissiotuottovaikutusalojen erot, kun vaikutusalat on laskettu CASMO-ohjelmilla.



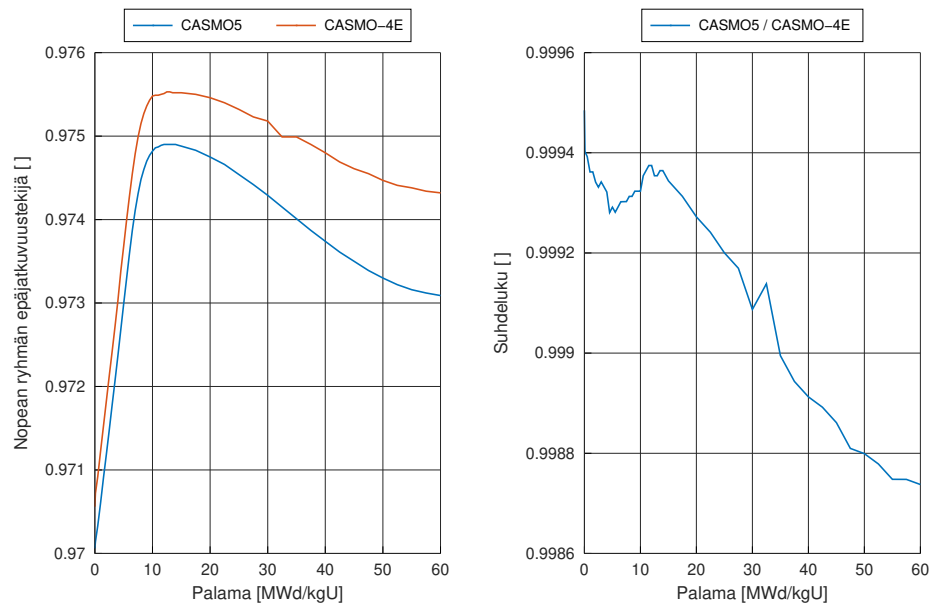
Kuva 47. Polttoaineen A kiinteän nipun termisen ryhmän fissiotuottovaikutusalojen erot, kun vaikutusalat on laskettu CASMO-ohjelmilla.



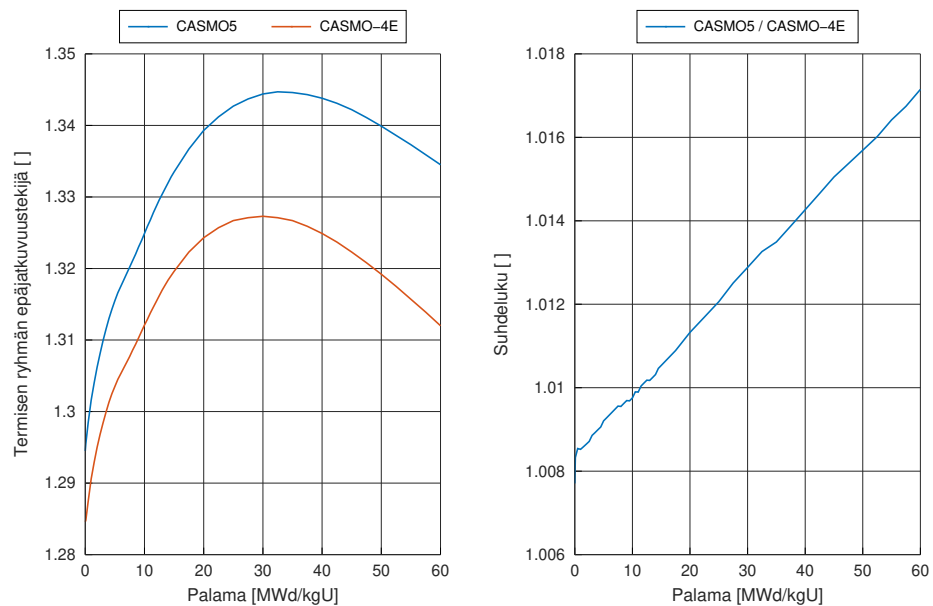
Kuva 48. Polttoaineen A kiinteän nipun poistovaikutusalojen erot, kun vaikutusalat on laskettu CASMO-ohjelmilla.



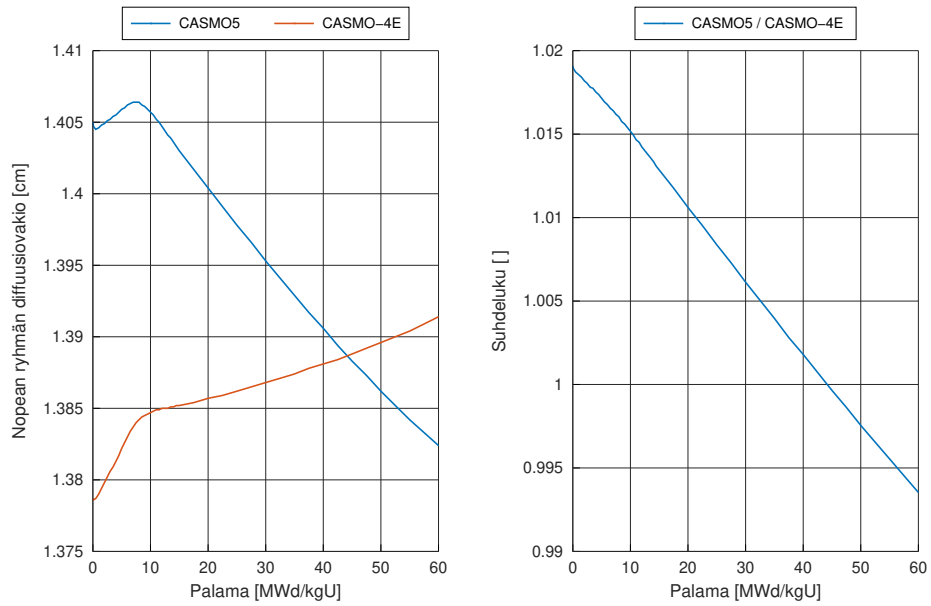
Kuva 49. Polttoaineen A kiinteän nipun fissiossa vapautuvan energian erot, kun vapautuva energia on laskettu CASMO-ohjelmilla.



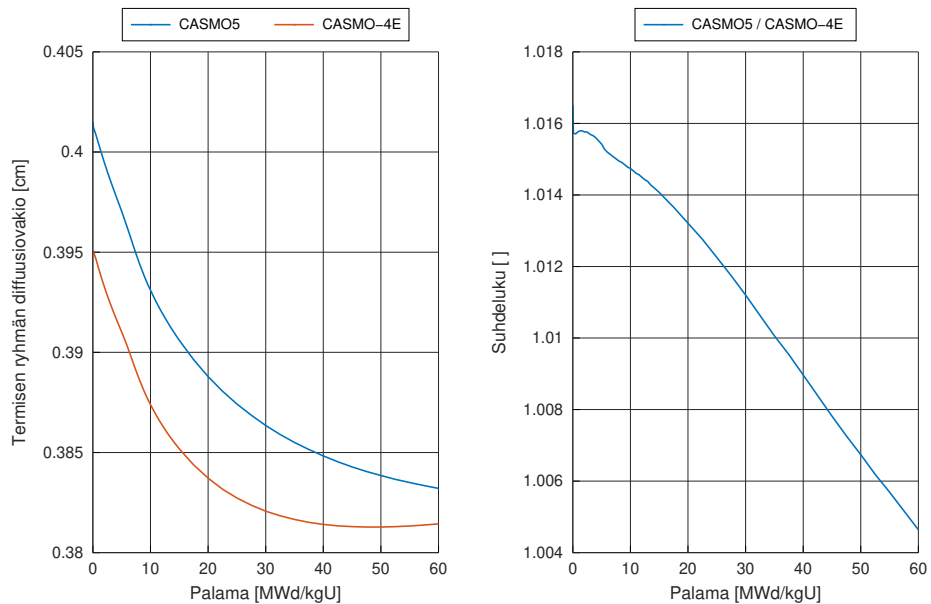
Kuva 50. Polttoaineen A kiinteän nipun nopean ryhmän epäjatkuvuustekijöiden erot, kun epäjatkuvuustekijät on laskettu CASMO-ohjelmilla.



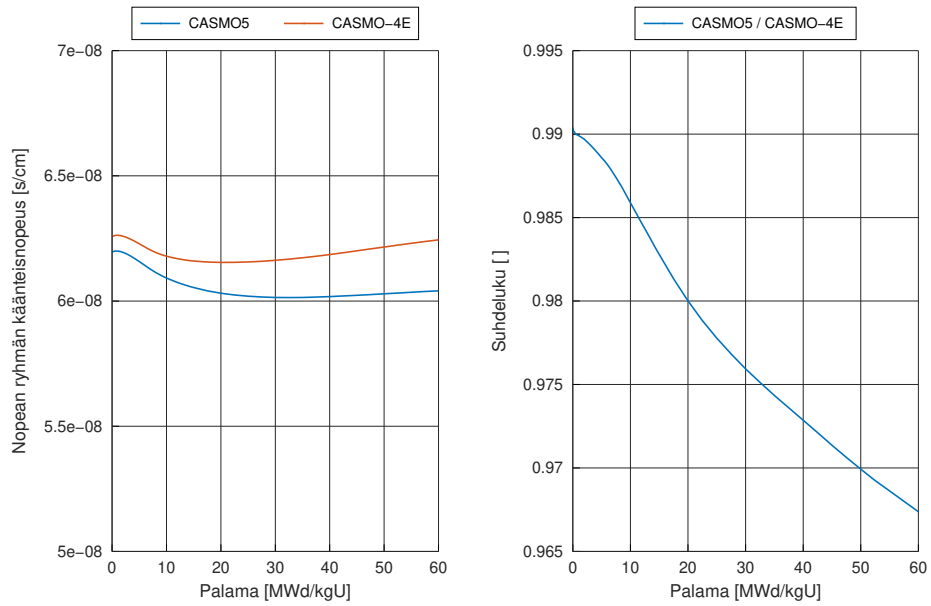
Kuva 51. Polttoaineen A kiinteän nipun termisen ryhmän epäjatkuvuustekijöiden erot, kun epäjatkuvuustekijät on laskettu CASMO-ohjelmilla.



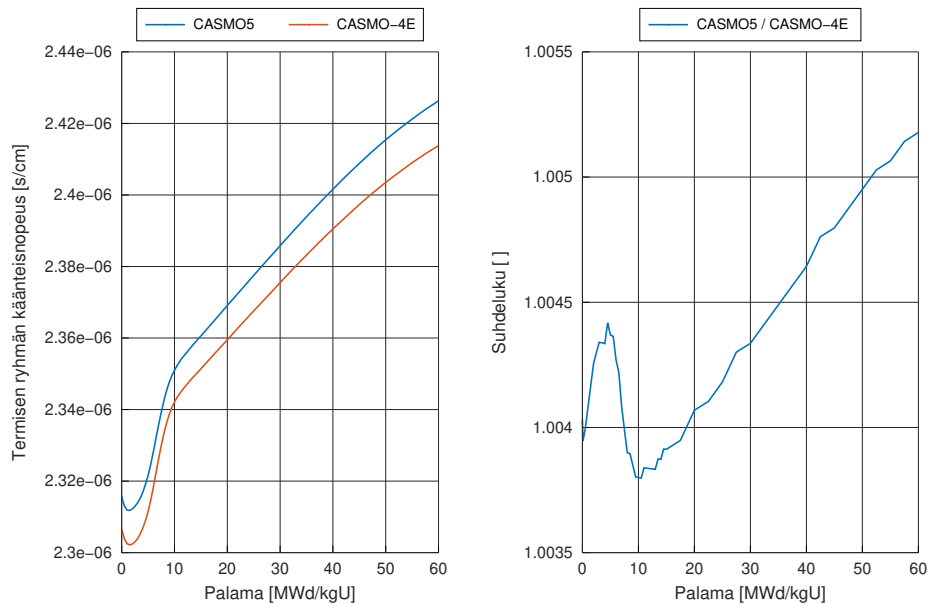
Kuva 52. Polttoaineen A kiinteän nipun nopean ryhmän diffuusiovakioiden erot, kun vakiot on laskettu CASMO-ohjelmilla.



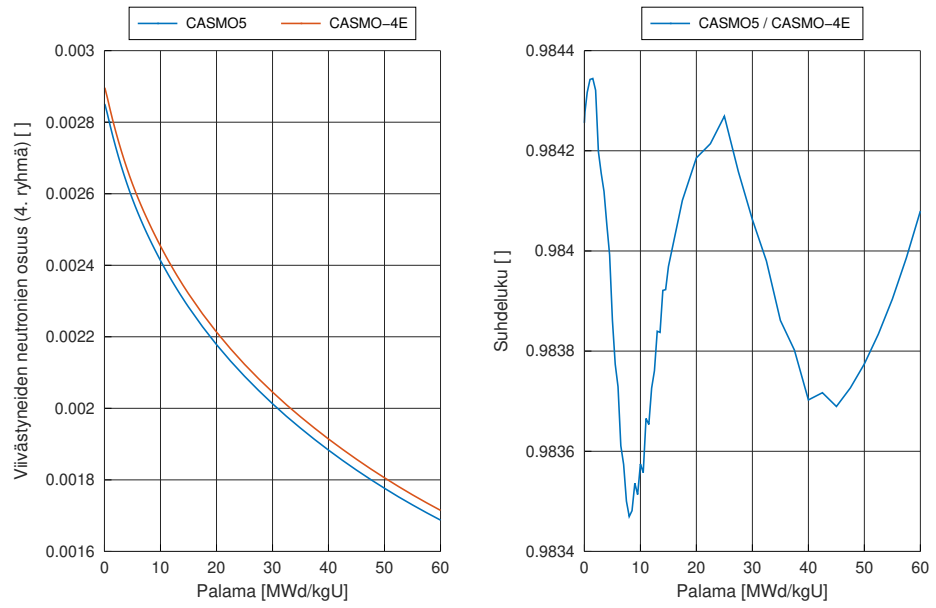
Kuva 53. Polttoaineen A kiinteän nipun termisen ryhmän diffuusiovakioiden erot, kun vakiot on laskettu CASMO-ohjelmilla.



Kuva 54. Polttoaineen A kiinteän nipun nopean ryhmän (vuo- ja adjointvuo painotettujen) käänteisnopeuksien erot, kun nopeudet on laskettu CASMO-ohjelmilla.

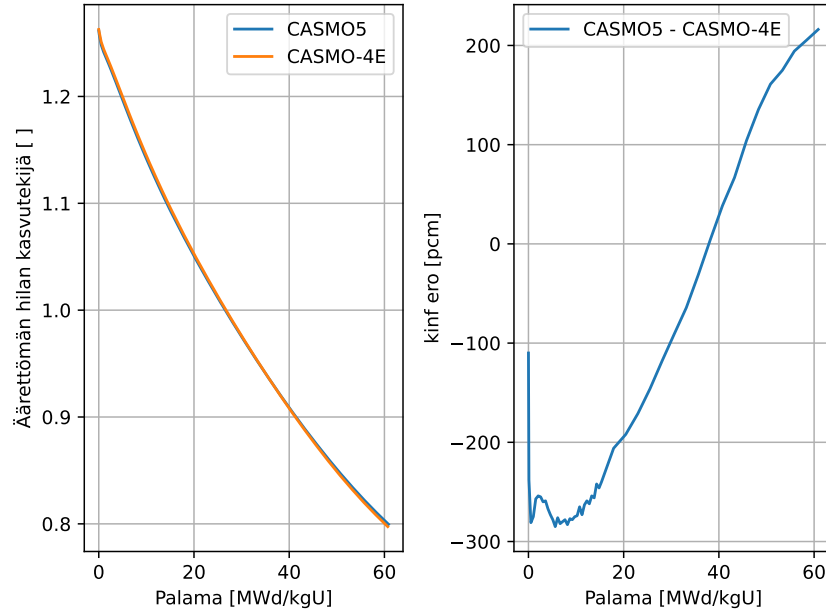


Kuva 55. Polttoaineen A kiinteän nipun termisen ryhmän (vuo- ja adjointvuo painotettujen) käänteisnopeuksien erot, kun nopeudet on laskettu CASMO-ohjelmilla.

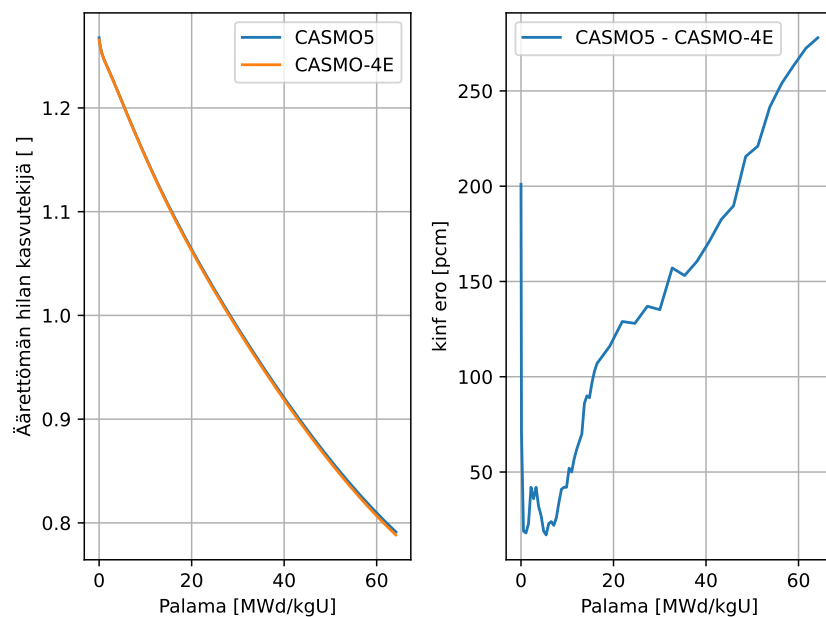


Kuva 56. Polttoaineen A kiinteän nipun prekursoriryhmän 4 viivästyneiden neutronien osuuksien erot, kun osuudet on laskettu CASMO-ohjelmilla.

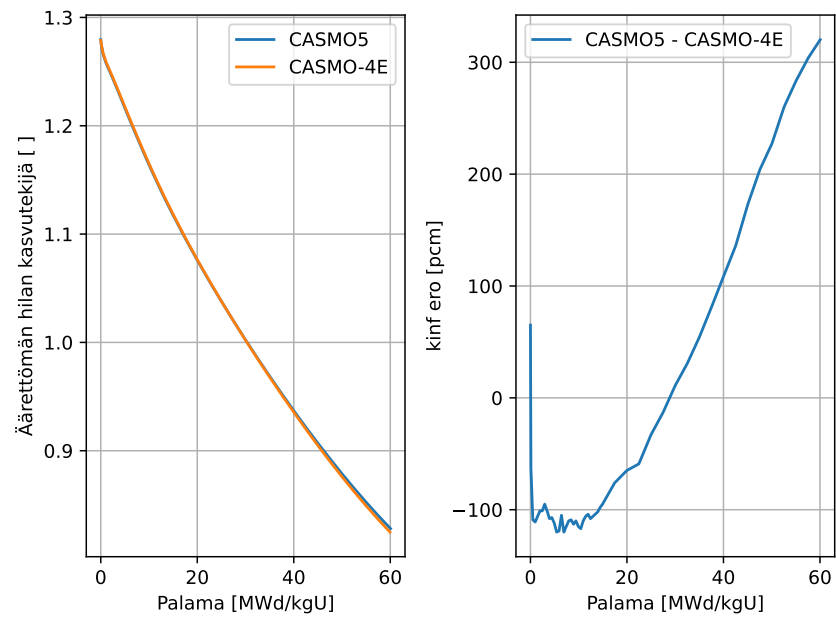
Liite 3. ELSI-1440-ohjelmassa käytettyjen diffuusioparametrien implisiittiset vertailutulokset



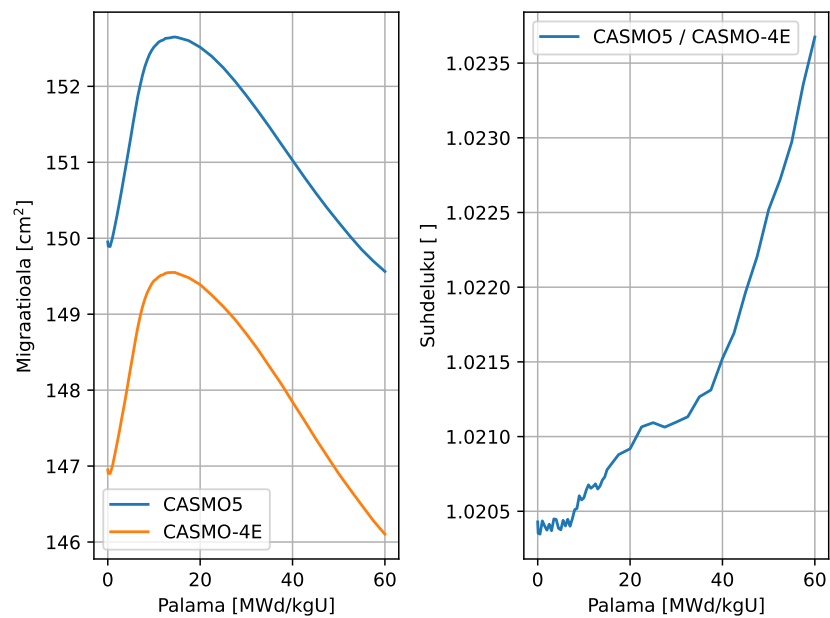
Kuva 57. Polttoaineen A jatkeen symmetria-akselilla sijaitsevan sauvakopin äärettömän hilan kasvutekijän erot, kun ryhmävaikutusalat on laskettu CASMO-ohjelmilla (tätä vastaavassa kopissa on kiinteässä nipussa gadoliniumia).



Kuva 58. Polttoaineen A kiinteän nipun reunassa sijaitsevan sauvakopin äärettömän hilan kasvutekijän erot, kun ryhmävaikutusalat on laskettu CASMO-ohjelmilla.



Kuva 59. Polttoaineen A kiinteän nipun normaalin sauvakopin (ei sijaitse reunassa, symmetria-akselilla tai kulmassa) äärettömän hilan kasvutekijän erot, kun ryhmävaikutusalat on laskettu CASMO-ohjelmilla.

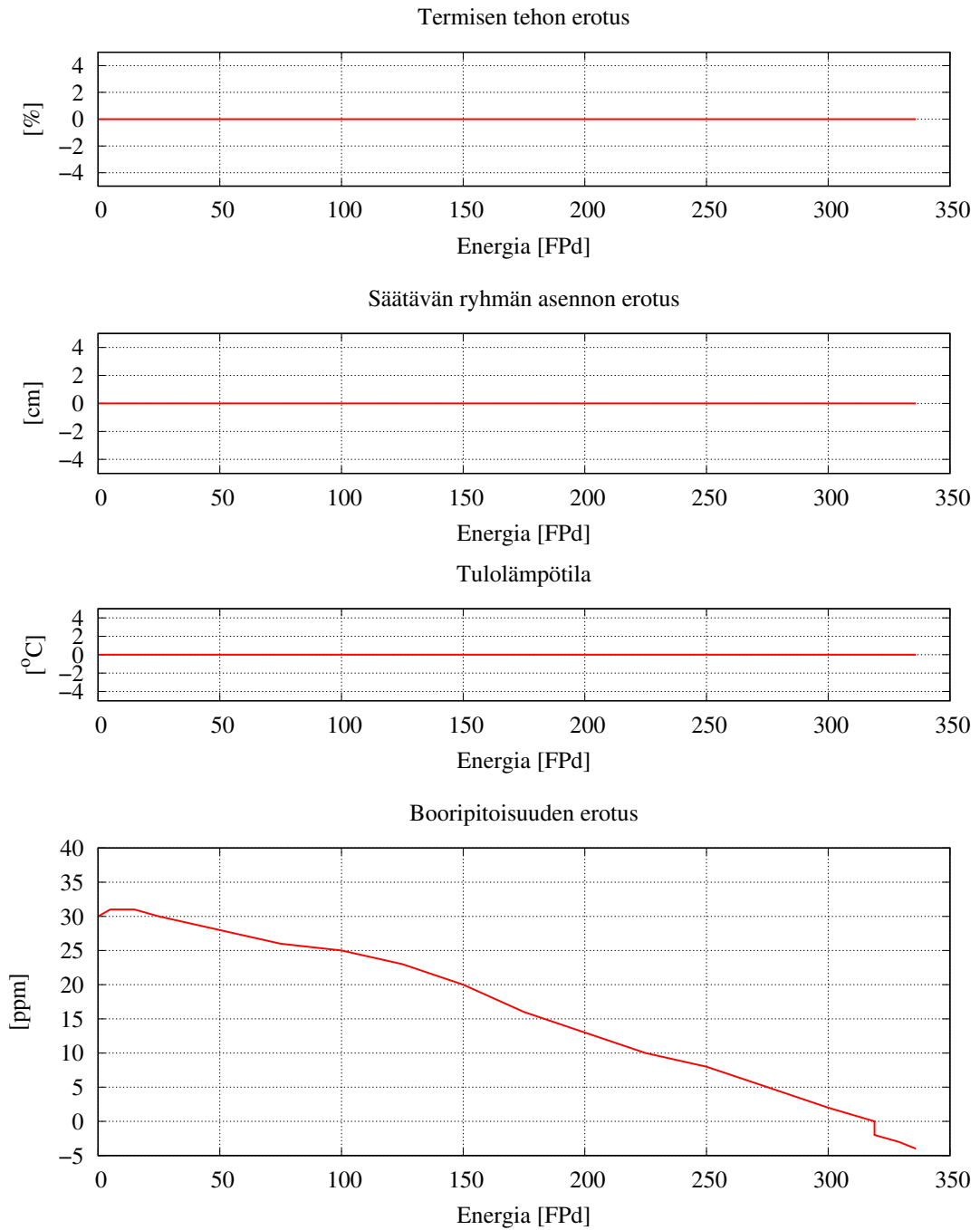


Kuva 60. Polttoaineen A nippujen välisen alueen migraatioalat, kun ryhmävaikutusalat on laskettu CASMO-ohjelmilla

Liite 4. Erot tasapainolatausten reaktorifysikaalisissa ominaisuuksissa

Loviisa-1

Tasapainolataus N, 1500 MW, CASMO-4E – CASMO5



Kuva 61. Reaktorin käyttöparametrit ja täyden tehon kriittisen booripitoisuuden erotus (CASMO-4E - CASMO5) energian funktiona.

Taulukko 13. BOC-tilan kriittisten booripitoisuuksien erotus (CASMO-4E - CASMO5) ja sammutusmarginaalien erotus boorihappopitoisuudella 13 g/kg (2275 ppm).

P MW	H ₆ cm	T _{in} °C	Xe -	Sm -	Kriit. boori ppm
1500	250	267.0	Tasap.	Tasap.	30.1
1500	225	267.0	Tasap.	Tasap.	30.0
1500	200	267.0	Tasap.	Tasap.	29.8
1500	175	267.0	Tasap.	Tasap.	29.7
0	200	260.0	0	Alkut.	14.9
0	200	260.0	0	Tasap.	19.0 *
0	250	100.0	0	Tasap.	4.9
0	250	150.0	0	Tasap.	6.3
0	250	200.0	0	Tasap.	9.7
0	250	230.0	0	Tasap.	14.4
0	250	260.0	0	Tasap.	19.6 **

* = Jakson alun fysikaalisten kokeiden kriittinen boori

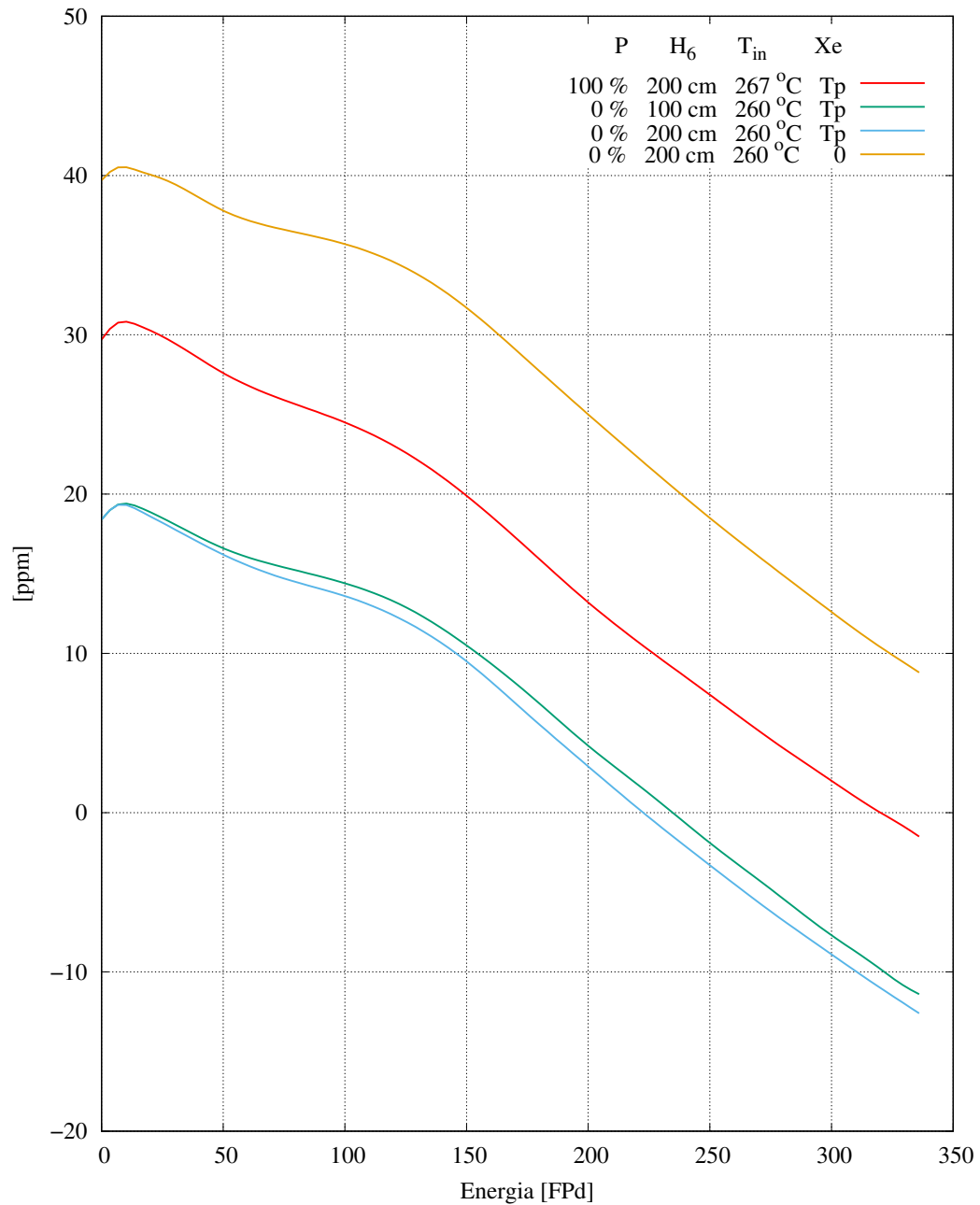
** = TD11B0001 mitoituksen kriittinen boori

P MW	H ₆ cm	T _{in} °C	Xe -	Sm -	Sammutusmarg. pcm
Sammutusmarginaalien erotus booripitoisuudella 2275 ppm.					
0	250	100.0	0	Tasap.	-109
0	250	150.0	0	Tasap.	-112
0	250	200.0	0	Tasap.	-131
0	250	230.0	0	Tasap.	-157
0	250	260.0	0	Tasap.	-186
Sammutusmarginaalien erotus booripitoisuudella 2245 ppm.					
0	250	100.0	0	Tasap.	-105
0	250	150.0	0	Tasap.	-108
0	250	200.0	0	Tasap.	-127
0	250	230.0	0	Tasap.	-154
0	250	260.0	0	Tasap.	-183

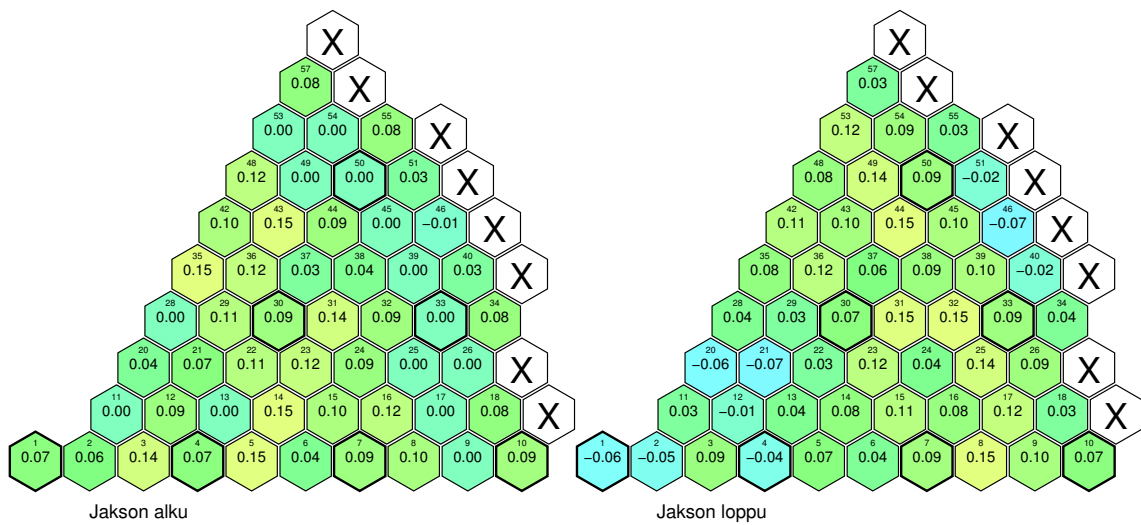
Loviisa-1

Tasapainolataus N, 1500 MW, CASMO-4E – CASMO5

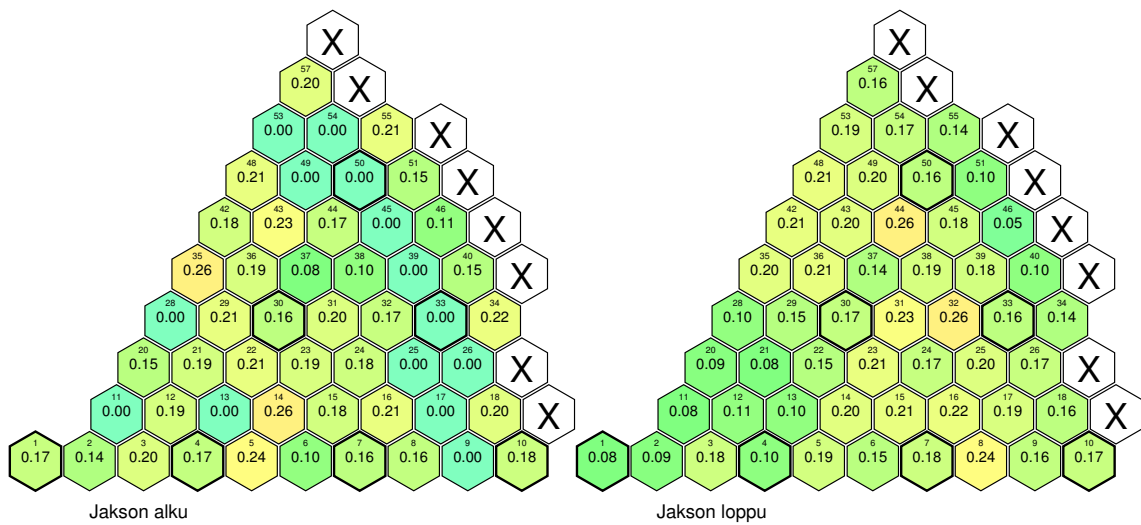
Kriittisen booripitoisuuden erotus



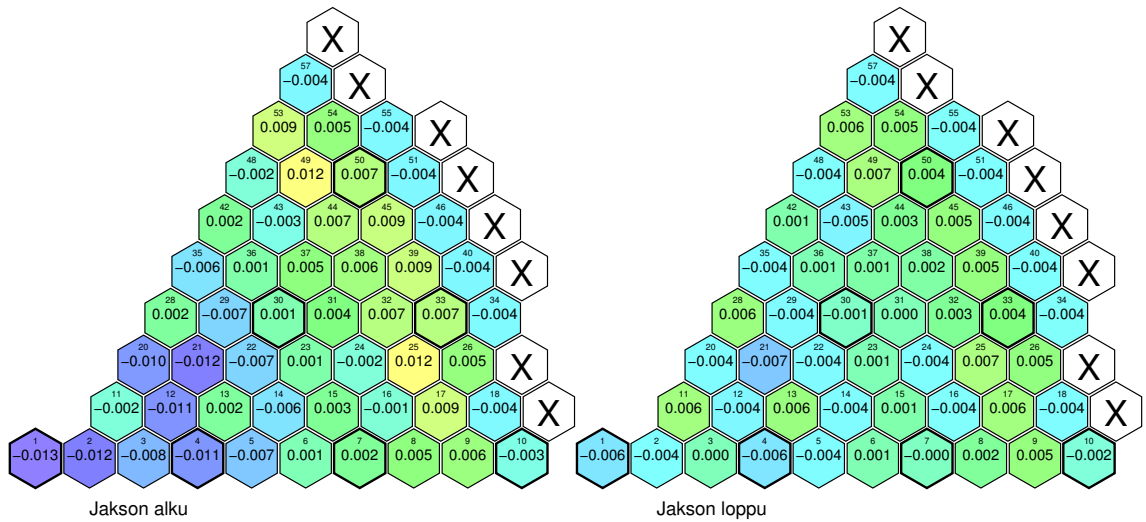
Kuva 62. Kriittisen booripitoisuuden erotus (CASMO-4E - CASMO5) palamajakson aikana täydellä teholla säätävän ryhmän asennolla 200 cm, kuumassa tilassa (260 °C) täyden tehon tasapainoksenonilla ja kuumassa tilassa ilman ksenonia. Täyden tehon tasapainoksenon on laskettu säätävän ryhmän asennolla 200 cm.



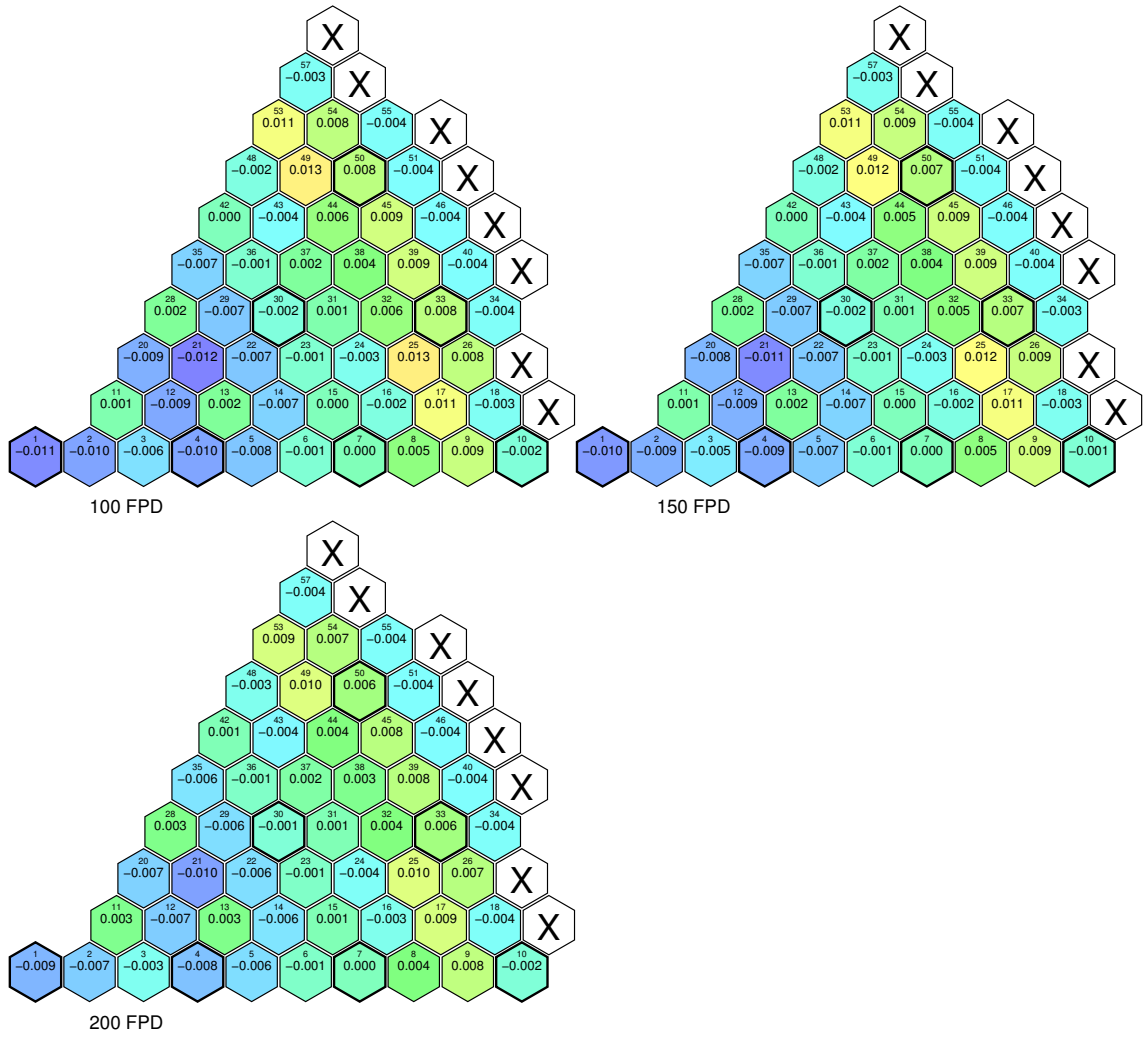
Kuva 63. Erotus (CASMO-4E - CASMO5) nippujen keskipalamissa [MWd/kgU] jakson alussa ja lopussa.



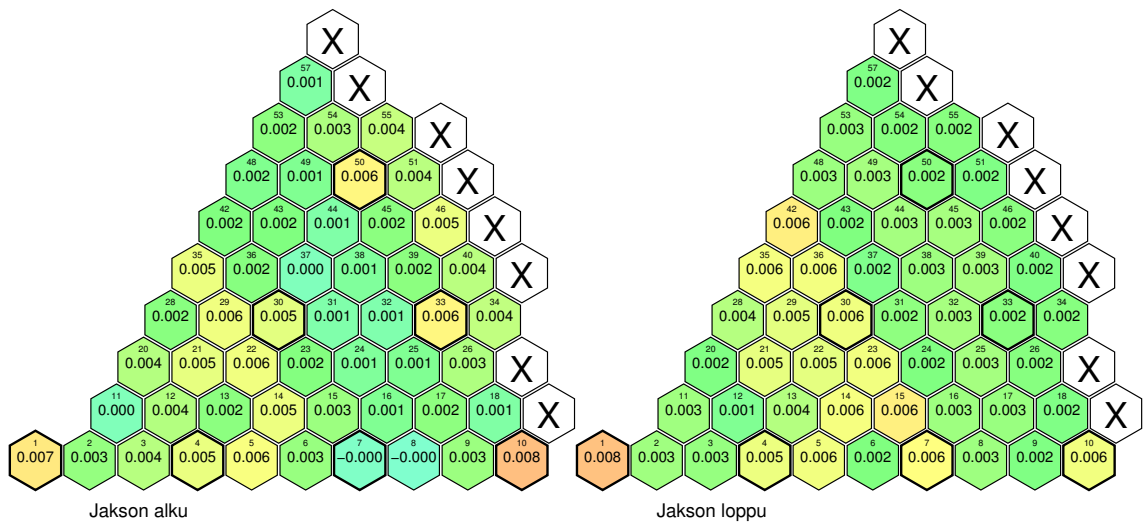
Kuva 64. Erotus (CASMO-4E - CASMO5) maksimisauvapalamissa [MWd/kgU] jakson alussa ja lopussa.



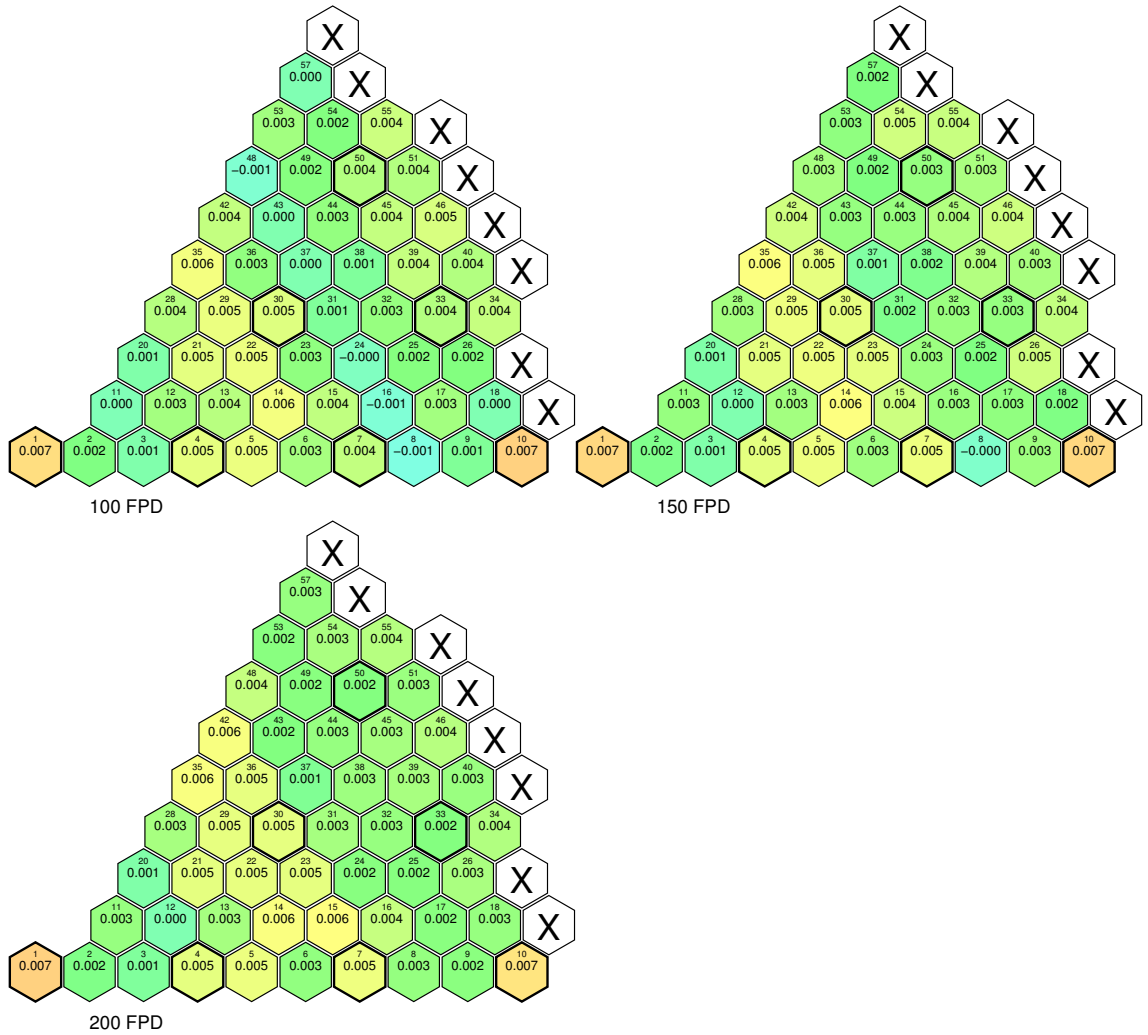
Kuva 65. Erotus (CASMO-4E - CASMO5) suhteellisissa nipputehoissa palamajakson alussa ja lopussa.



Kuva 66. Erotus (CASMO-4E - CASMO5) suhteellisissa nipputehoissa energioilla 100 FPD, 150 FPD ja 200 FPD.



Kuva 67. Erotus (CASMO-4E - CASMO5) nipun sisäisten tehojakautumien muutokertoimissa palamajakson alussa ja lopussa.



Kuva 68. Erotus (CASMO-4E - CASMO5) nipun sisäisten tehojakautumien muutokertoimissa energioilla 100 FPD, 150 FPD ja 200 FPD.

Taulukko 14. Tehojakautuman muotokertoimien ja termisten marginaalien erotus (CASMO-4E - CASMO5) käyttöjakson aikana. Neljällä ylimmällä ja alimmalla rivillä tulokset ovat jakson alusta ja lopusta säätävän ryhmän asennoilla 250, 225, 200 ja 175 cm. Muut tulokset on ilmoitettu säätävän ryhmän asennolla 250 cm.

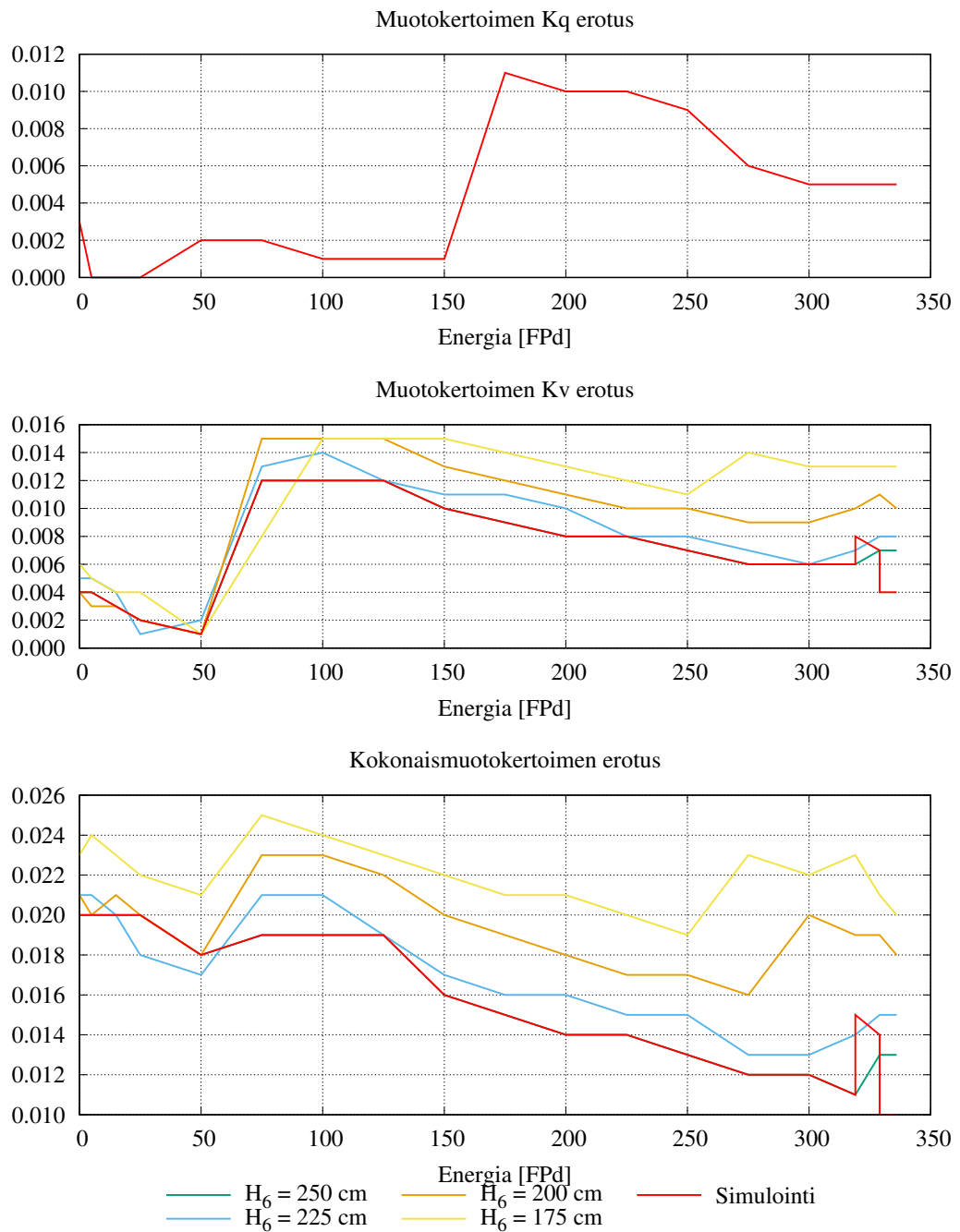
E FPD	P %	H ₆ cm	T _{in} °C	C _B ppm	K _q	K _V	K _{tot}	q' W/cm	T _{sub} °C	q' _{vra} %	ΔH _{vra} %	DNB
0.0	0.0	0	0.0	30	0.003	0.004	0.020	3	0.1	-1.1	-0.2	-0.02
0.0	0.0	0	0.0	30	0.004	0.005	0.021	3	0.1	-1.1	-0.3	-0.02
0.0	0.0	0	0.0	29	0.004	0.004	0.021	3	0.1	-0.9	-0.2	-0.02
0.0	0.0	0	0.0	30	0.004	0.006	0.023	4	0.1	-1.0	-0.3	-0.01
0.0	0.0	0	0.0	30	0.003	0.004	0.020	3	0.1	-1.1	-0.2	-0.02
0.0	0.0	0	0.0	31	0.000	0.004	0.020	4	0.0	-1.1	-0.2	-0.02
0.0	0.0	0	0.0	31	0.000	0.003	0.020	3	0.1	-1.2	-0.3	-0.04
0.0	0.0	0	0.0	30	0.000	0.002	0.020	3	0.1	-1.1	-0.2	-0.03
0.0	0.0	0	0.0	28	0.002	0.001	0.018	3	0.1	-1.0	-0.2	-0.03
0.0	0.0	0	0.0	26	0.002	0.012	0.019	3	0.1	-1.1	-0.2	-0.03
0.0	0.0	0	0.0	25	0.001	0.012	0.019	3	0.2	-1.1	-0.5	-0.03
0.0	0.0	0	0.0	23	0.001	0.012	0.019	3	0.4	-1.0	-0.9	-0.07
0.0	0.0	0	0.0	20	0.001	0.010	0.016	3	0.4	-0.9	-0.8	-0.07
0.0	0.0	0	0.0	16	0.011	0.009	0.015	3	0.4	-0.9	-0.9	-0.06
0.0	0.0	0	0.0	13	0.010	0.008	0.014	2	0.3	-0.9	-0.7	-0.06
0.0	0.0	0	0.0	10	0.010	0.008	0.014	2	0.3	-0.9	-0.7	-0.05
0.0	0.0	0	0.0	8	0.009	0.007	0.013	2	0.3	-0.8	-0.6	-0.05
0.0	0.0	0	0.0	5	0.006	0.006	0.012	2	0.3	-0.8	-0.6	-0.06
0.0	0.0	0	0.0	2	0.005	0.006	0.012	2	0.3	-0.7	-0.6	-0.06
0.0	0.0	0	0.0	0	0.005	0.006	0.011	1	0.2	0.1	-0.6	-0.05
0.0	0.0	0	0.0	-2	0.005	0.008	0.015	2	0.2	0.0	-0.6	-0.05
0.0	0.0	0	0.0	-3	0.005	0.007	0.014	3	0.3	0.3	-0.6	-0.04
0.0	0.0	0	0.0	-3	0.005	0.004	0.010	1	0.2	0.5	-0.7	-0.05
0.0	0.0	0	0.0	-4	0.005	0.004	0.010	2	0.3	0.4	-0.7	-0.05
0.0	0.0	0	0.0	-2	0.006	0.007	0.013	2	0.3	0.4	-0.5	-0.06
0.0	0.0	0	0.0	-1	0.006	0.008	0.015	3	0.2	0.3	-0.5	-0.03
0.0	0.0	0	0.0	-1	0.006	0.010	0.018	3	0.2	0.1	-0.5	-0.03
0.0	0.0	0	0.0	-1	0.007	0.013	0.020	3	0.2	0.0	-0.5	-0.04

Paine 123 bar, massavirtauksen ero venytysajossa 0 kg/s.

E	= jakson energia	K _{tot}	= kokonaismuotokerroin
P	= reaktorin teho	q'	= max. lineaariteho
H ₆	= 6. ryhmän asento	T _{sub}	= max. alikanavan lähtölämpötila
T _{in}	= tulolämpötila	q' _{vra}	= lineaaritehovara
C _B	= booripitoisuus	ΔH _{vra}	= entalpianousuvara
K _q	= radiaalimuotokerroin	DNB	= minimi DNB-suhde
K _V	= 3D-muotokerroin		

Loviisa-1

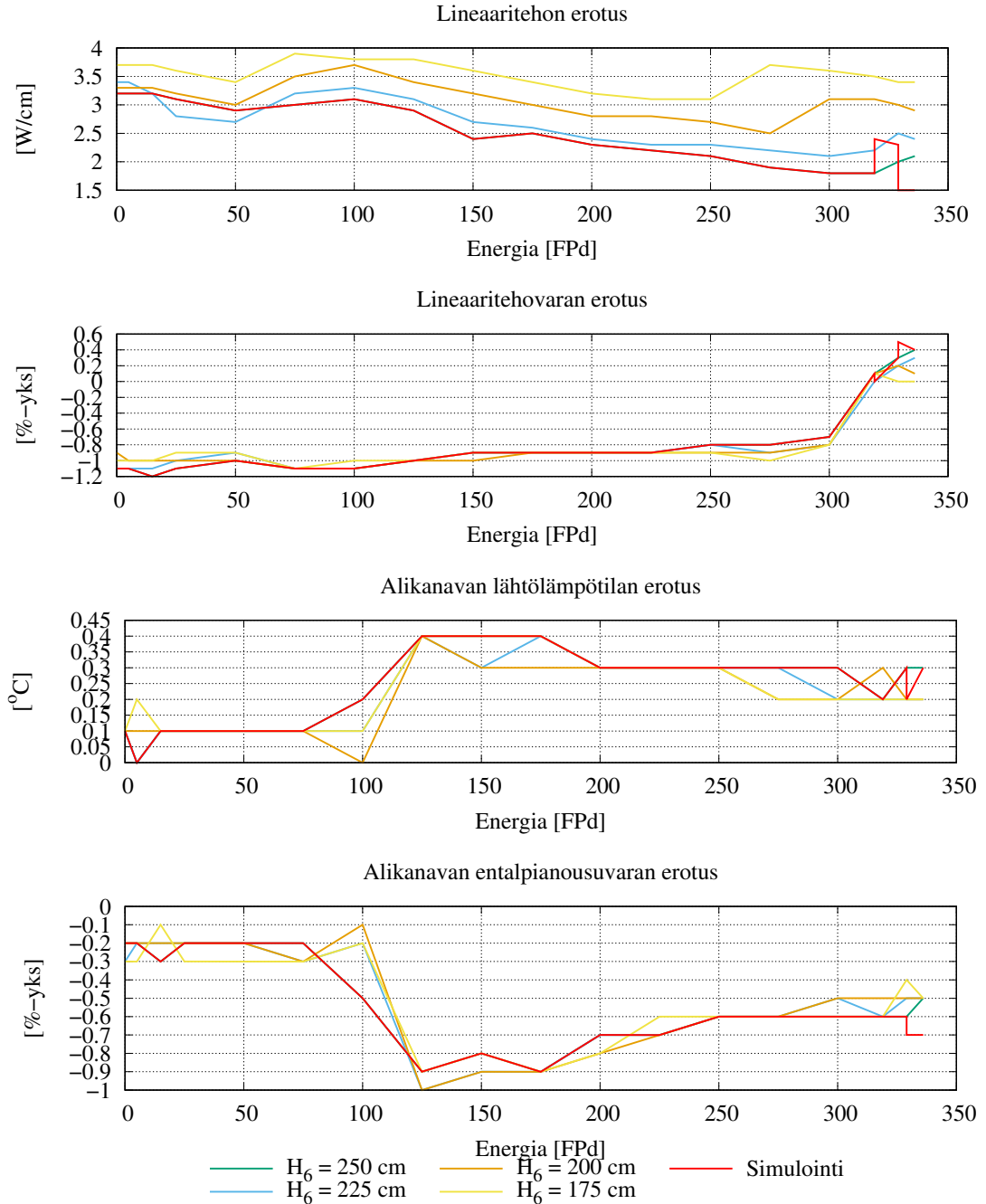
Tasapainolataus N, 1500 MW, CASMO-4E – CASMO5



Kuva 69. Tehojakauman muotokertoimien erotukset (CASMO-4E - CASMO5) palaman ja säätösauvojen asennon funktiona.

Loviisa-1

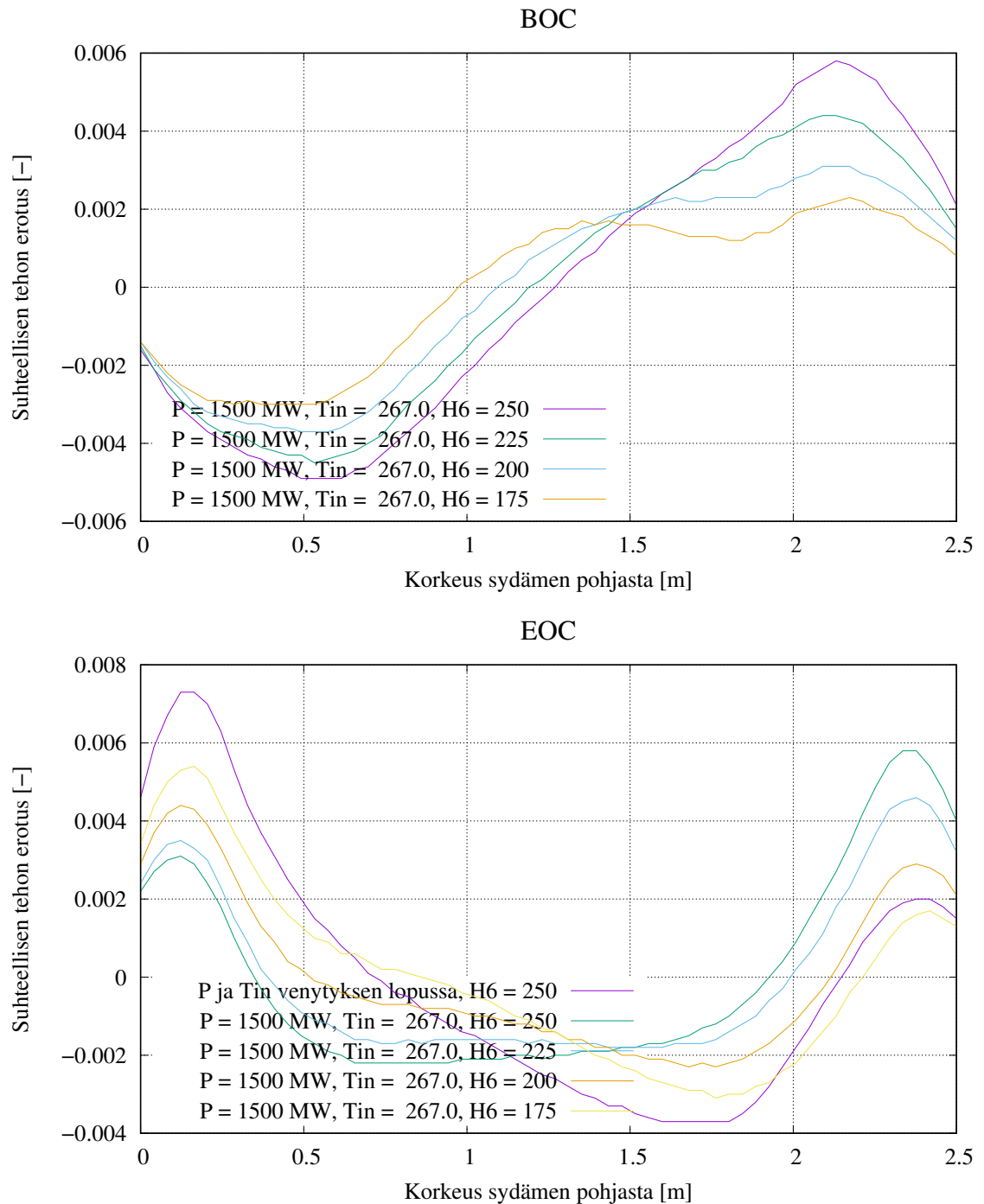
Tasapainolataus N, 1500 MW, CASMO-4E – CASMO5



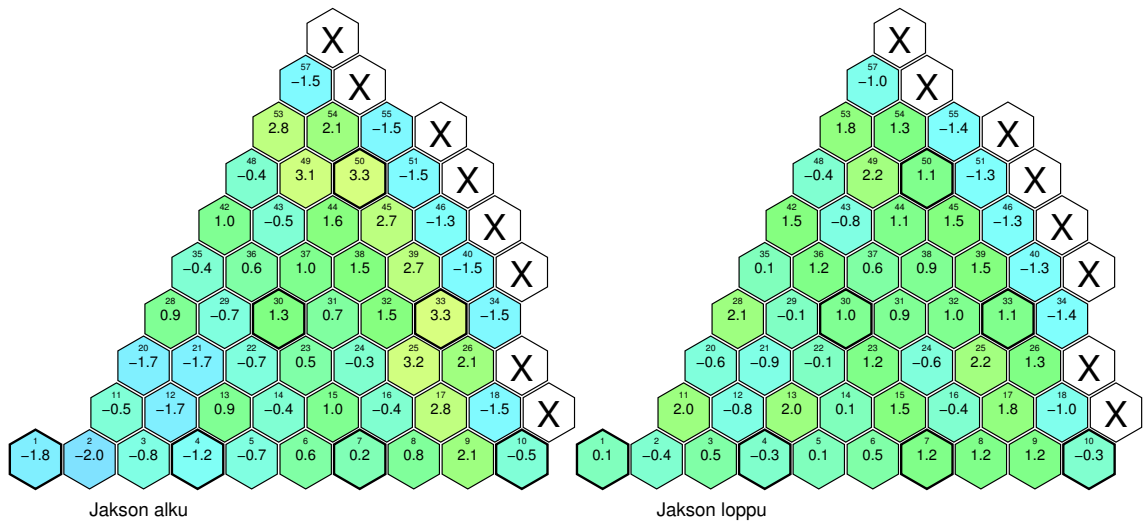
Kuva 70. Termisten marginaalien erotukset (CASMO-4E - CASMO5) palaman ja säätösauvojen asennon funktiona, kun palamalaskut on tehty liitteen 1 kuvan 1.3 ja raportin LO1-T453-00017 liitteen 1 kuvan 1.3 parametrein.

Loviisa-1

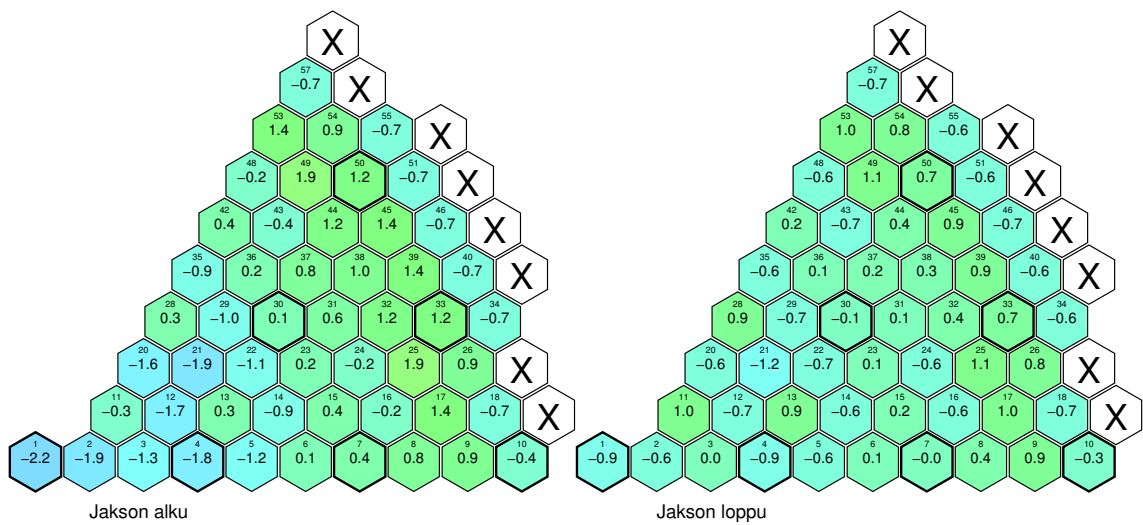
Tasapainolataus N, 1500 MW, CASMO-4E – CASMO5



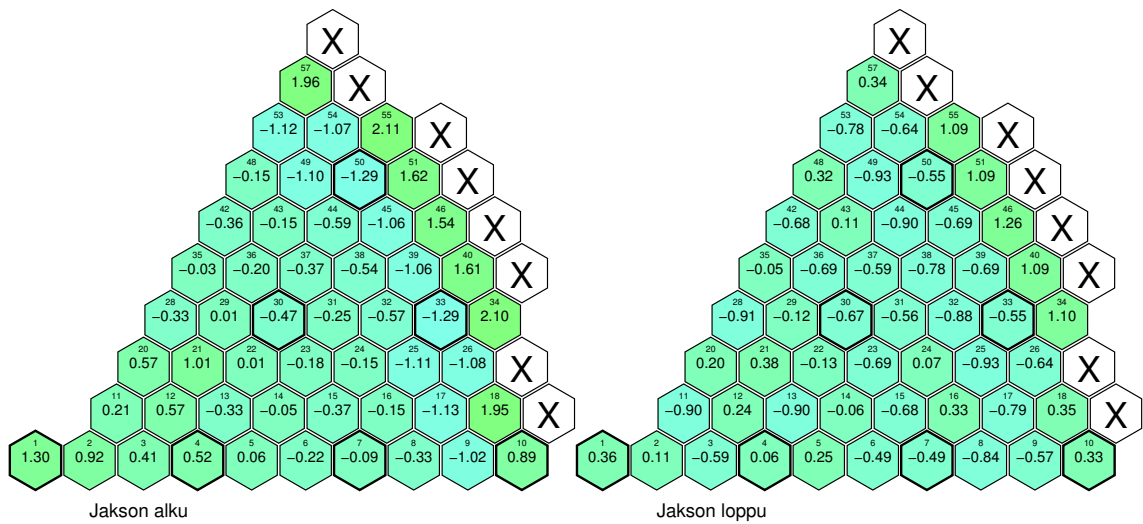
Kuva 71. Erotus (CASMO-4E - CASMO5) aksiaalisessa tehojakaumassa jakson alussa ja lopussa eri säätösauvan asennoilla.



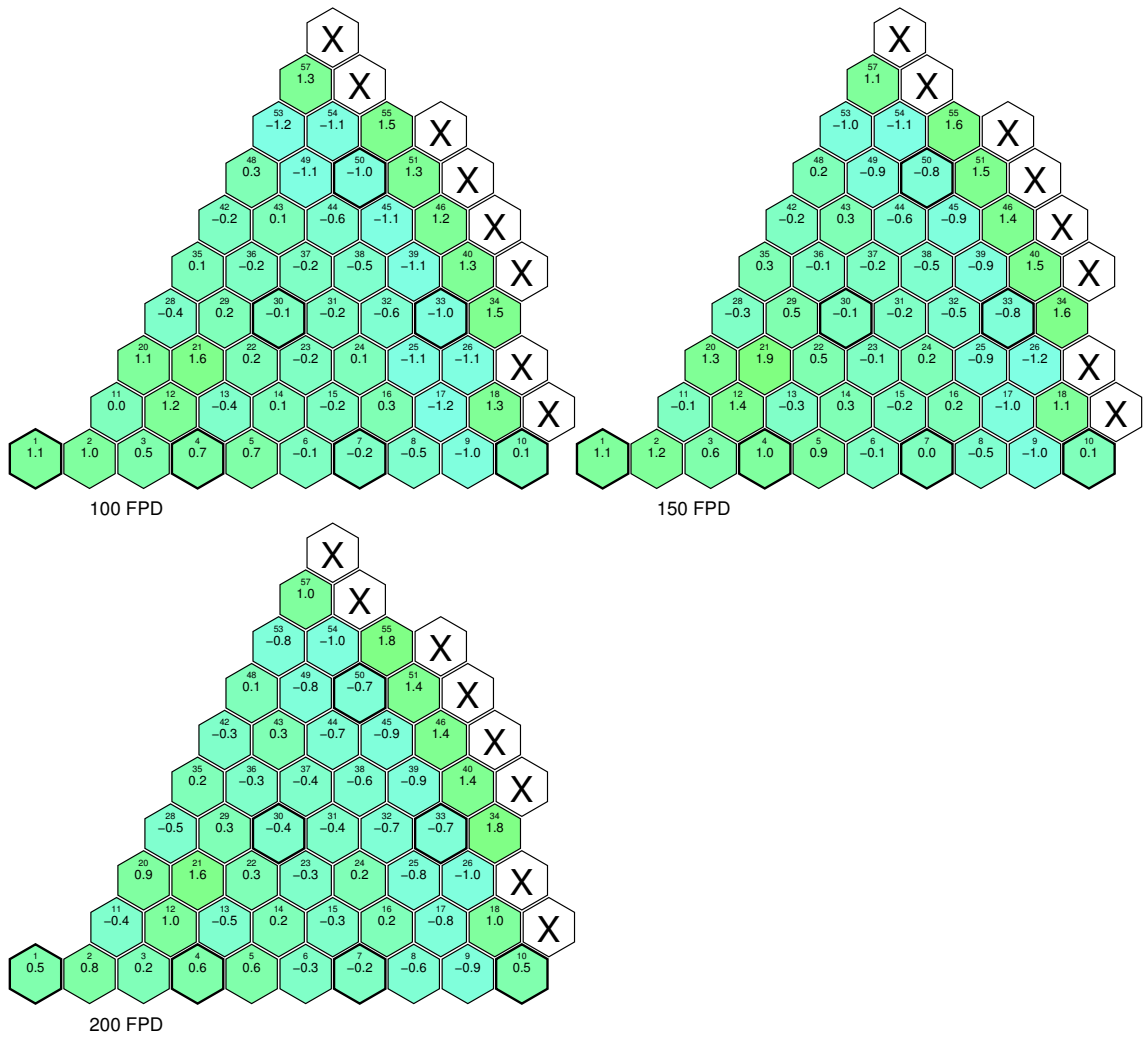
Kuva 72. Erotus (CASMO-4E - CASMO5) maksimilineaaritehoissa [W/cm] jakson alussa ja lopussa.



Kuva 73. Erotus (CASMO-4E - CASMO5) keskimääräisissä lineaaritehoissa [W/cm] jakson alussa ja lopussa.



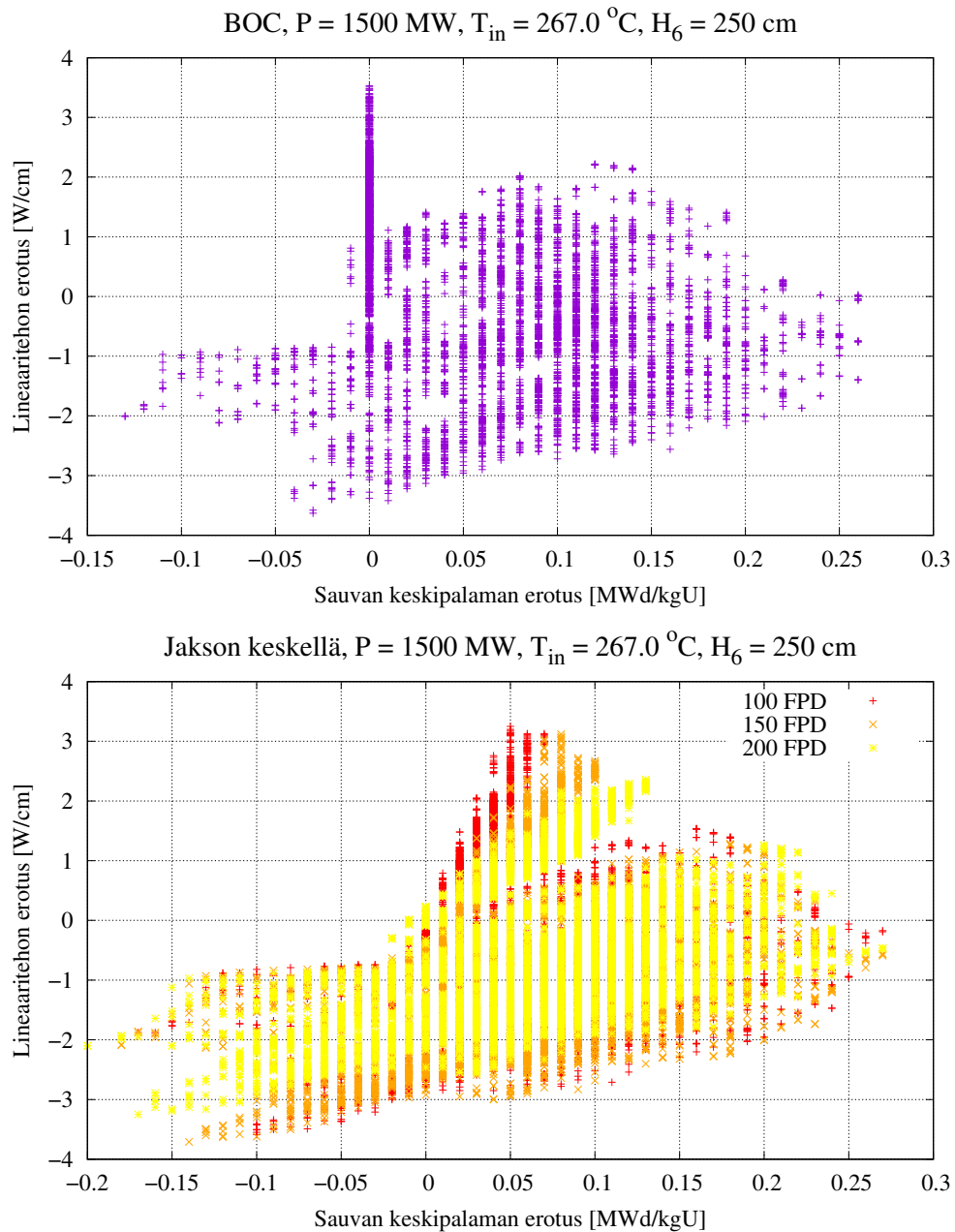
Kuva 74. Erotus (CASMO-4E - CASMO5) palamarippuvaan lineaaritehorajaan [%-yks.] jakson alussa ja lopussa.



Kuva 75. Erotus (CASMO-4E - CASMO5) palamarippuvaan lineaaritehorajaan [%-yks.] energioilla 100 FPD, 150 FPD ja 200 FPD.

Loviisa-1

Tasapainolatus N, 1500 MW, CASMO-4E – CASMO5

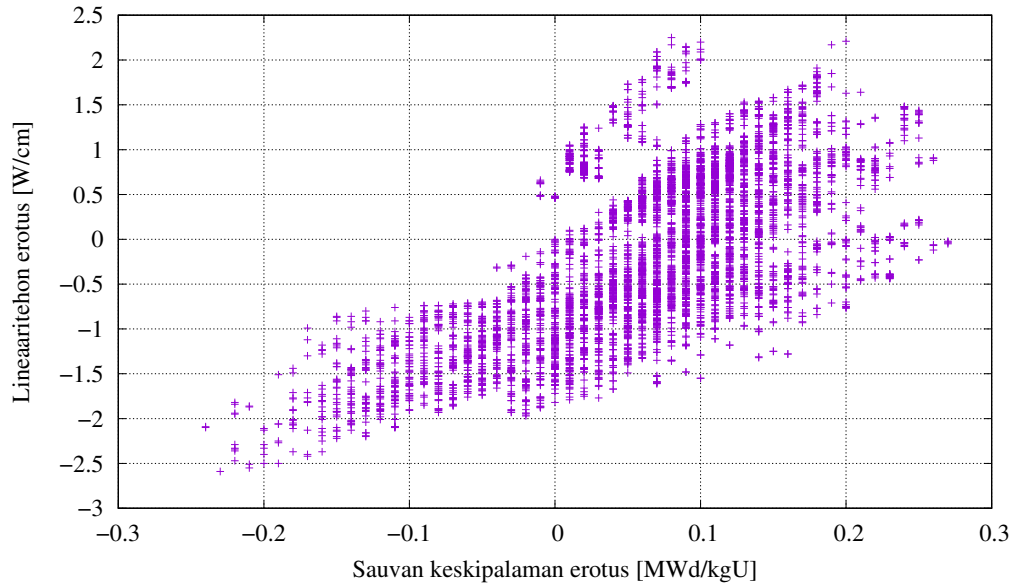


Kuva 76. Polttoainesauvan maksimilineaaritehojen erotus (CASMO-4E - CASMO5) sauvan keskipalaman erotuksen funktiona jakson alussa ja energioilla 100 FPD, 150 FPD, 200 FPD. Lineaaritehoissa on mukana varmuuskerroin 1,115.

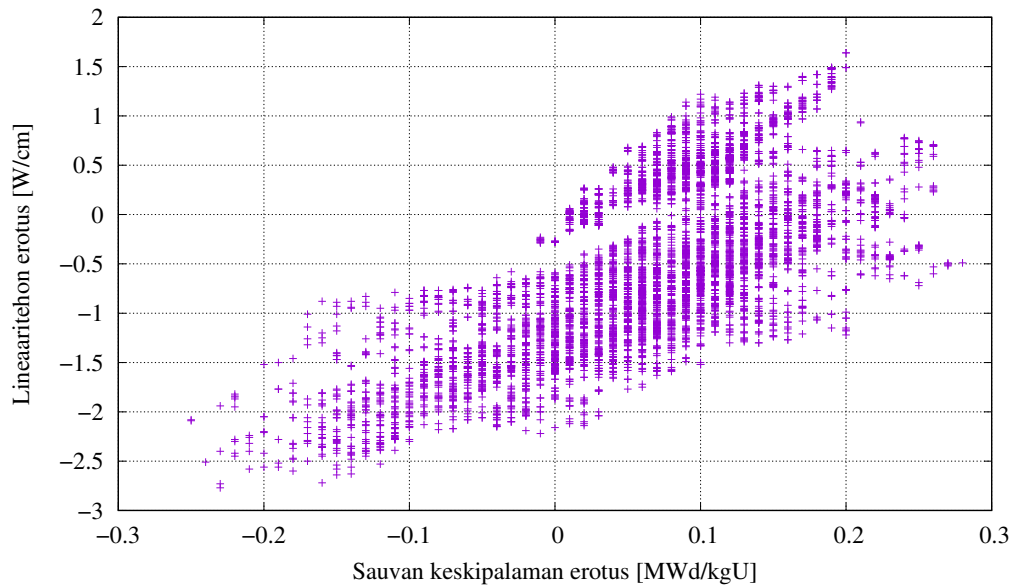
Loviisa-1

Tasapainolatus N, 1500 MW, CASMO-4E – CASMO5

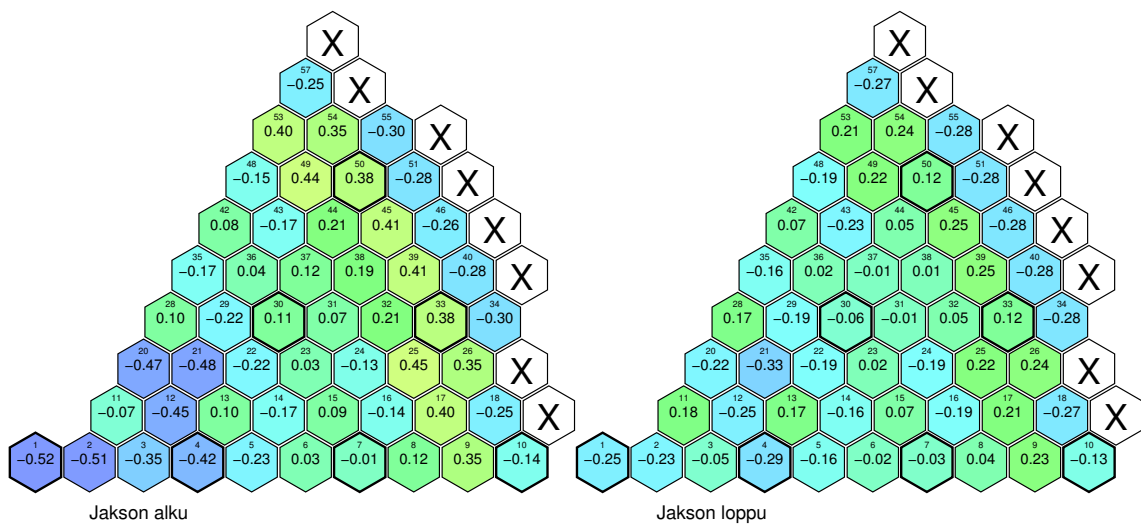
Nimellinen EOC, $P = 1500 \text{ MW}$, $T_{\text{in}} = 267.0 \text{ }^\circ\text{C}$, $H_6 = 250 \text{ cm}$



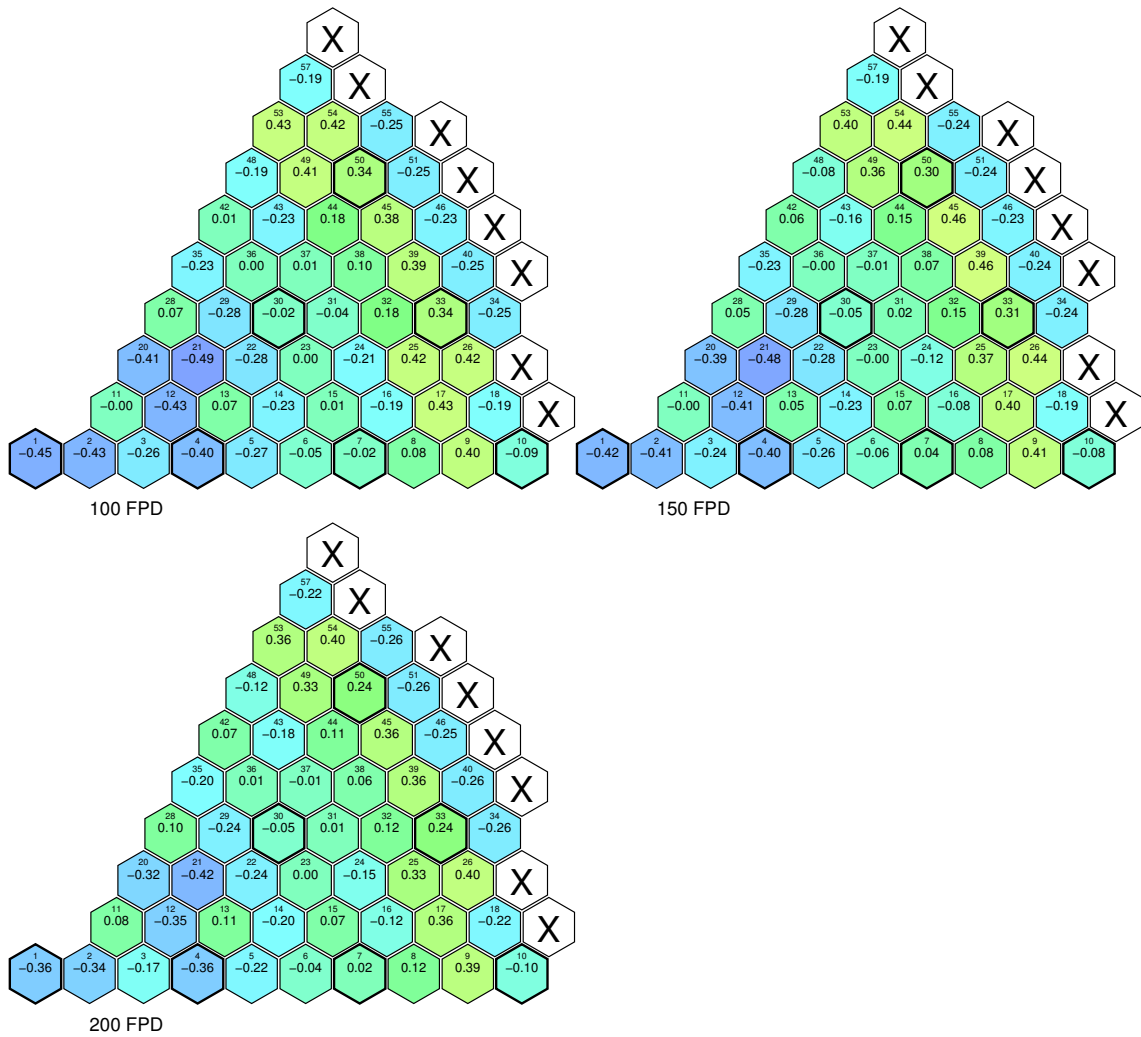
EOC, $P = 1402.5 \text{ MW}$, $T_{\text{in}} = 261.8 \text{ }^\circ\text{C}$, $H_6 = 250 \text{ cm}$



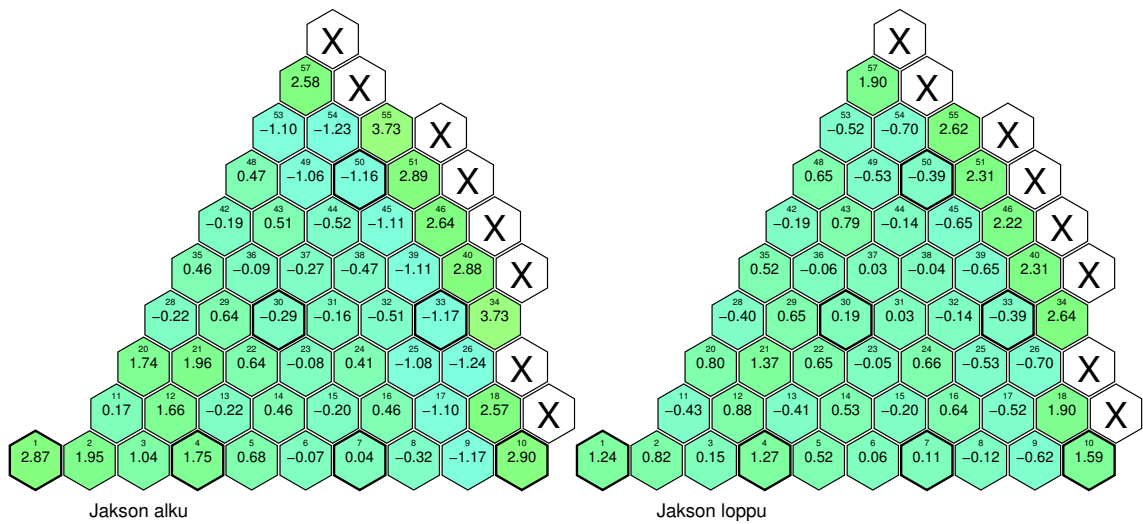
Kuva 77. Polttoainesauvan maksimilineaaritehojen erotus (CASMO-4E - CASMO5) sauvan keskipalaman erotuksen funktiona jakson nimellisessä sekä oikeassa lopussa. Lineaaritehoissa on mukana varmuuskerroin 1,115.



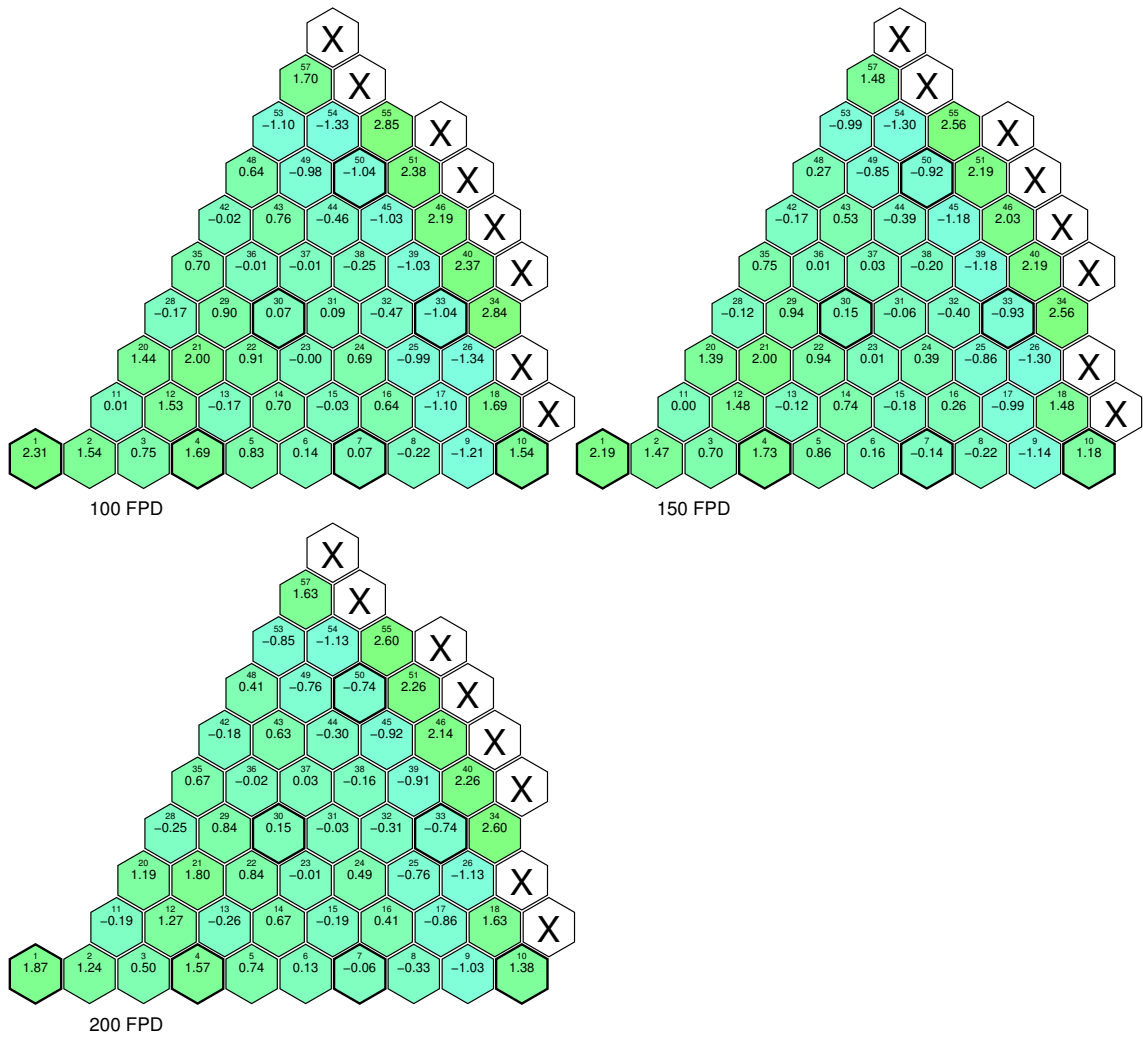
Kuva 78. Erotus (CASMO-4E - CASMO5) alikanavan maksimilähtölämpötiloissa [C] jakson alussa ja lopussa. Lämpötilat sisältävät kuumen alikanavan entalpianousun varmuuskertoimen 1,110.



Kuva 79. Erotus (CASMO-4E - CASMO5) alikanavan maksimilähtölämpötiloissa [C] energioilla 100 FPD, 150 FPD ja 200 FPD. Lämpötilat sisältävät kuumen alikanavan entalpiansuun varmuuskertoimen 1,110.



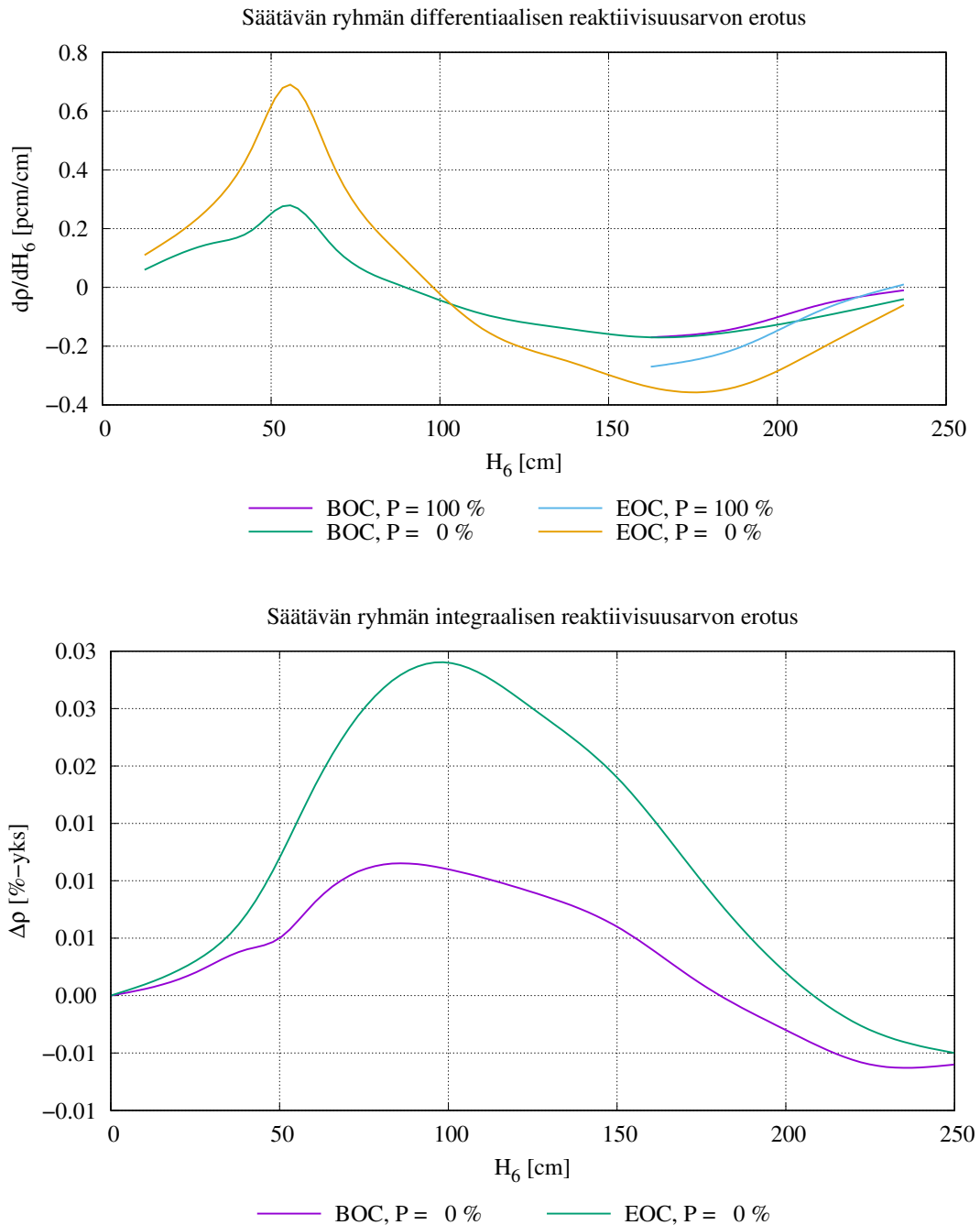
Kuva 80. Erotus (CASMO-4E - CASMO5) alkanavan entalpiamuutoksissa [%-yks.] jakson alussa ja lopussa.



Kuva 81. Erotus (CASMO-4E - CASMO5) alikanavan entalpiansuvarassa [%-yks.] energioilla 100 FPD, 150 FPD ja 200 FPD.

Loviisa-1

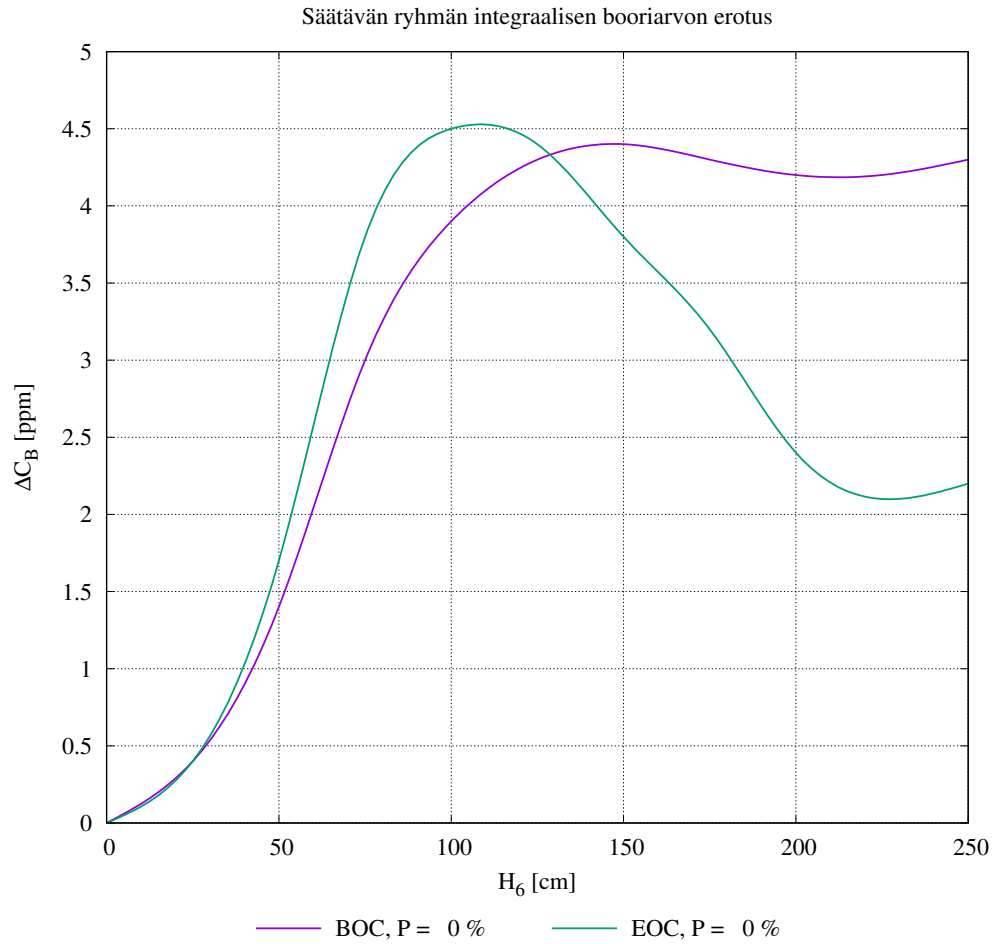
Tasapainolataus N, 1500 MW, CASMO-4E – CASMO5



Kuva 82. Säätävän ryhmän (6. ryhmä) differentiaalisten reaktiivisuusarvojen eroukset (CASMO-4E - CASMO5) ja integraalisten reaktiivisuusarvojen erotukset jakson alussa ja lopussa.

Loviisa-1

Tasapainolataus N, 1500 MW, CASMO-4E – CASMO5



Kuva 83. Säätävän ryhmän (6. ryhmä) integraalisten booriarvojen erotukset (CASMO-4E - CASMO5) nolstateholla ilman ksenonia jakson alussa ja lopussa.

Taulukko 15. Säätosauvojen tehokkuuksien erotukset (CASMO-4E - CASMO5) kuumassa tilassa (260 °C). Yksittäisten sauvojen tehokkuudet on laskettu täyden sydämen laskuina.

Ryhmä (paikka)	Ylös jääneiden ryhmien ja ryhmien yksittäisten sauvojen reaktiivisuuksien erotukset (%-yks)			
	Jakson alku		Jakson loppu	
	Koko ryhmä	Yksittäinen sauva	Koko ryhmä	Yksittäinen sauva
1 (10)	0.00	0.00	-0.01	0.00
2 (30)	-0.01	0.01	-0.06	-0.05
3 (33)	0.01	0.02	-0.03	-0.02
4 (50)	0.01	0.02	-0.03	-0.02
5 (4)	-0.07	-0.02	-0.08	-0.05
6 (1+7)	0.00	0.01 u	-0.05	-0.04 u
6 (1+7)		-0.03 k		-0.03 k

Ryhmä 6 on säätävä ryhmä

u = ryhmän ulkosauva (paikka 7)

k = ryhmän keskussauva (paikka 1)

Tapaus	Pikasulun tehokkuuden erotus (%-yks)	
	Jakson alku	Jakson loppu
PS	-0.04	-0.07
PS-1	-0.06	-0.03
PS	= täydellinen pikasulku	
PS-1	= pikasulku ilman reaktiivisinta sauvaa	

Taulukko 16. Sammutusmarginaalien erotukset (CASMO-4E - CASMO5) ilman boorinsyöttöä eri tiloissa. EOC-tilassa ja lämpötilalla 260 °C CASMO-4E-vakioilla juuttunut sauva on paikassa 3 ja CASMO5-vakioilla paikassa 6.

Palamatila	Lämpötila °C	Sammutusmarginaali		
		PS pcm	juuttunut sauva	PS-1 pcm
BOC	260	43	6	30
BOC	174	77	6	57
EOC	260	77	eroaa	108
EOC	174	-12	6	11

PS = täydellinen pikasulku
PS-1 = pikasulku ilman reaktiivisinta sauvaa

Taulukko 17. Reaktiivisuuskertoimien erotukset (CASMO-4E - CASMO5) ja sydämen pistekinetiikkaparametrien erotukset. Kaikki BOC-tilan nollatehon parametrit ja EOC-tilan pistekinetiikkaparametrit on laskettu kriittisellä booripitoisuudella. EOC-tilan isoterminen lämpötilakerroin on laskettu käyttäen nollabooria.

Nollatehon kertoimet lämpötilassa 260 °C, H ₆ = BOC 200 cm ja EOC 250 cm			
		BOC	EOC
Isoterminen lämpötilakerroin	pcm/°C	1.86	2.93

Täyden tehon reaktiivisuuskertoimet (H ₆ = 250 cm)			
		BOC	EOC
Jäähdytteen tiheyskerroin	pcm/(kg/m ³)	-1.43	-1.68
Jäähdytteen lämpötilakerroin	pcm/°C	2.67	3.68
Polttoaineen lämpötilakerroin	pcm/°C	0.22	0.28
Tehokerroin (T _{in} vakio)	pcm/%	1.32	1.78
Boorikerroin	pcm/ppm	0.12	0.08

Nollatehon pistekinetiikkaparametrit (260 °C, H ₆ = 200 cm)			
		BOC	EOC
Kerkeiden neutronien elinikä	μs	-0.10	0.10
β_1	%	0.00	0.00
β_2	%	0.00	0.00
β_3	%	0.00	0.00
β_4	%	0.00	0.00
β_5	%	0.00	0.00
β_6	%	0.00	0.00
β_{eff}	%	0.01	0.01

