

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
School of Energy Systems
Energiatekniikka
Diplomityö

**REAKTIIVISUUSTRANSIENTTIEN HALLINNAN KEHIT-
TÄMINEN LOVIISAN YDINVOIMALAITOKSELLE**

**IMPROVING MANAGEMENT OF REACTIVITY TRAN-
SIENTS FOR LOVIISA NUCLEAR POWER PLANT**

Tarkastajat: Professori, TkT Juhani Hyvärinen
Apulaisprofessori, TkT Heikki Suikkanen

Ohjaaja: DI Jaakko Kuopanportti

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Riku Leppänen

LUT School of Energy Systems, Energiatekniikka

Diplomityö 2021

Tarkastajat: Professori, TkT Juhani Hyvärinen

Apulaisprofessori, TkT Heikki Suikkanen

Ohjaaja: DI Jaakko Kuopanportti

80 sivua, 20 kuvaa, 4 taulukkoa ja 2 liitettä

Hakusanat: reaktiivisuuden hallinta, VVER-440, ReactranHelp

Reaktiivisuus kuvaa poikkeamaa kriittisestä reaktorista. Tehoreaktorissa reaktiivisuuteen vaikuttaa takaisinkytkennät, sillä sydämen materiaalien neutronifysikaaliset ominaisuudet muuttuvat termisen tehon muuttuessa. Esimerkiksi voimakkaan neutronimyrkyn ksenon-135:n käyttäytyminen vahvistaa reaktiivisuusvaikutusta neutronivuon muutossuuntaan. Näin ollen reaktiivisuutta täytyy hallita aktiivisesti. Loviisan VVER-440-reaktoriyksiköissä hallitseminen toteutetaan säätösauvoja liikuttelemalla, sekä jäähdytteen tulolämpötilaa ja booripitoisuutta muuttamalla. Tietyistä reaktorin käyttöhäiriöistä voi seurata voimakas reaktiivisuustransientti. Esimerkiksi säätösauvan tipahtaminen voi myrkyttää sydämen epähomogeenisesti, jolloin reaktiivisuus muuttuu paikallisesti muuta sydäntä voimakkaammin. Se voi puolestaan johtaa termisten marginaalien ylittymiseen energiantuotannon painoutuessa pienempään tilavuuteen sydämessä.

Tässä diplomityössä kehitetään Loviisan VVER-440-reaktoriyksiköille uusi reaktiivisuustransienttien hallintaa avustava työkalu ReactranHelp. Työssä pyritään vastaamaan ydinvoimalaitoksen käyttöorganisaation ja reaktorifysiikkaryhmän vaatimuksiin, jotka ovat peräisin nykyisen työkalun puutteista ja huonoista käyttökokemuksista. Uuden työkalun täytyy kyetä ennustamaan optimaalinen reaktorin tehon nostaminen, reaktiivisuuden säätö sekä termisten marginaalien käyttäytyminen reaktiivisuustransientin aikana.

ReactranHelp käyttää hyödyksi Loviisan VVER-440-reaktoriyksiköiden termisten marginaalien nykytilavalvontaan käytettyä RESU-98:a. Se simuloi reaktorisydämiä kolmiulotteisesti sekä hyödyntää tuloksien tarkentamiseen mittausinstrumentointia. Optimaalinen tehon nostaminen ja reaktiivisuuden säätö arvioidaan menetelmällä, jossa säätömekanismien säätövarat käytetään loppuun prioriteettijärjestyksessä. Lisäksi menetelmässä varmistetaan samalla riittävän suuret termiset marginaalit.

ReactranHelp todettiin validoiduksi tapauksella, joka tapahtui Loviisa-1:llä heinäkuussa 2020. Säätösauva tippui ala-asentoon yhdeksäksi tunniksi, jonka seurauksena sydämen kuumimman alikanavan lähtölämpötila nousi 0,1 °C:n päähän turvallisuusrajasta tehonnoston jälkeen. ReactranHelp ennusti reaktiivisuuden säädön optimaalisemmaksi, sillä se ehdotti käytettäväksi matalampaa jäähdytteen tulolämpötilaa. Lisäksi termiset marginaalit ennustettiin riittävän hyvällä tarkkuudella.

ABSTRACT

Student's name: Riku Leppänen

LUT School of Energy Systems, Energy technology

Master's thesis 2021

Supervisors: Professor, D.Sc. (Tech.) Juhani Hyvärinen

Assistant professor, D.Sc. Heikki Suikkanen

Instructor: M.Sc. Jaakko Kuopanportti

80 pages, 20 figures, 4 tables and 2 appendices

Keywords: reactivity management, VVER-440, ReactranHelp

Reactivity describes the deviation from the critical reactor. In power reactors, the reactivity is affected by feedback effects because the neutron physicals properties of the core's materials change when thermal power changes. For example, strong neutron poison xenon-135 amplifies the reactivity effect in the same direction as neutron flux changes. Thus, reactivity must be managed actively. In the VVER-440 reactors, reactivity can be managed by moving control rods, changing the core's inlet temperature, and boron concentration of the coolant. Some malfunctions or incidents can lead to strong reactivity transients. For example, falling of control rod can poison the reactor core inhomogeneously which in turn causes reactivity to change locally more strongly compared to the rest of the core. It can lead thermal marginals to exceed since the thermal energy production balances into a smaller volume.

In this master's thesis, a new auxiliary tool ReactranHelp is developed for the management of reactivity transients for Loviisa VVER-440 reactors. The tool is developed to meet the requirements of the operating organization and reactor physics group. The requirements have arisen from shortcomings and poor user experience of the current reactivity management tool. The new tool must be able to evaluate the optimal way to raise the power, manage the reactivity and predict the behaviour of the thermal marginals.

ReactranHelp takes advantage of RESU-98 program which is used to supervise the thermal marginals of the Loviisa VVER-440 reactors. It simulates the reactor cores in 3D and utilizes measurement instrumentation to refine the results. An optimal way to raise the power and manage the reactivity is estimated with a method that exhausts reactivity control mechanisms in priority order. In the process, sufficient thermal marginals are ensured.

ReactranHelp was validated successfully with a case that occurred at Loviisa-1 in July 2020. One control rod dropped to the down position for nine hours which in turn got the hottest subchannel temperature to raise 0,1 °C away from the safety limit after thermal power was raised. ReactranHelp suggested a more optimal way to manage reactivity since it proposed a lower inlet temperature of the coolant to be used. Also, the thermal marginals were predicted with sufficient accuracy.

ALKUSANAT

Viimeinen opiskeluvuoteni oli aikamoinen koettelemus kahdesta syystä: Ensimmäinen syy oli koronapandemia, joka on rajoittanut ihmisten elämää aina vuoden 2020 alusta lähtien. Todennäköisesti se rajoittaa vielä pitkään tästä hetkestä eteenpäinkin. Toinen syy oli järjettömän suuri työkuorma: muita kursseja täytyi suorittaa vielä 52:n opintopisteen verran diplomityön lisäksi. Ajattelin, että mitäpä muuta tekemistä minulla olisi koronapandemian aikana, kun suorittaa maisterivaihe loppuun. Kaikki (fyysiset) opiskelijatapahtumat olivat nimittäin peruttu tilanteen hillitsemiseksi!

Viimeisestä vuodesta kuitenkin selvittiin ja siitä kiitos kuuluu monelle. Kiitän Jaakko Kuopanporttia diplomityön ohjaamisesta, jota ilman koko työ olisi jäänyt tekemättä. Kiitän myös muita Loviisan ydinvoimalaitoksen reaktorifysiikka- ja polttoaineturvallisuusryhmän jäseniä hyvästä työilmapiiristä. Koronapandemialla ei näyttänyt olevan mitään haittavaikutusta ryhmien tehokkuuteen, sillä lähes kaikki onnistui etänä. Myös tämä diplomityö on kirjoitettu kotitoimistosta käsin. Kiitän professori Juhani Hyväristä ja muuta yliopiston ydinvoimatekniikan puolta laadukkaasta ja mielenkiintoisesta opetuksesta näiden vuosien aikana. Viimeisenä muttei vähimpänä suuret kiitokset kuuluu lähipiirilleni suuresta henkisestä tuesta!

Lappeenrannassa 25.5.2021

Riku Leppänen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	6
1.1	Taustaa.....	7
1.2	Käyttäjien toivomukset ja odotukset	8
2	TEORIA	10
2.1	Loviisan VVER-440-reaktorit	10
2.1.1	Loviisan reaktorisydän	11
2.2	Reaktiivisuus	14
2.3	Reaktiivisuuden säätö	20
2.4	Loviisan reaktorisydämien laskenta	24
2.4.1	HEXBU-ELSI	25
2.4.2	RESU-98	30
3	MENETELMIEN TOIMINTALOGIIKKA	33
3.1	Reaktiivisuustransienttien analyysifunktio.....	33
3.2	Booraus- ja laimennusfunktio.....	35
3.3	Reaktiivisuustransienttien ennustusfunktio	39
3.3.1	Ennusteen alustus	41
3.3.2	Kriittisyyden haku.....	47
3.3.3	Sydämen lisästabilointi	52
4	TULOKSET	54
4.1	Validoinnissa käytettävä tapaus	54
4.2	Reaktiivisuustransienttien analyysifunktion validointi	59
4.3	Booraus- ja laimennusfunktion verifiointi.....	61
4.4	Reaktiivisuustransienttien ennustusfunktion validointi.....	64
4.4.1	Ennustetarkkuuden arviointi	65
4.4.2	Optimaalinen reaktiivisuuden säätö	69
4.4.3	Sydämen lisästabilointi	74
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	77
6	YHTEENVETO	80
7	LÄHDELUETTELO.....	81

LIITTEET

- Liite I TTKE:n mukaiset tehon nostonopeuden rajoitukset
- Liite II RML-mittausnauha ja tunnuksien selitykset

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

t	aika	s, min, h
D	diffuusiovakio	cm
h	hilaväli	cm
n	indeksi tai lukumäärä	-
f	kantafunktio	-
k	kasvutekijä	-
x, y, z	koordinaatit	mm, cm, m
q	lineaariteho	W/cm
T	lämpötila	°C
R	marginaalin minimiarvo	%, °C
M	massa	kg
\dot{m}	massavirtaus	kg/s
\tilde{F}, G	minimoitava funktio	-
p	paine	bar
c	painotuskerroin, virityskerroin	-
C	pitoisuus	ppm, g/kg
r	reaktiivisuus	pcm, \$, c
F	sakkofunktio	-
S	sekoitusvaiheen kytkennän termi	g/s
H	säätösauvaryhmän asento	cm, mm
P	teho	MW
Q	tehotiheys	W/cm ³
E	tuotettu energia	FPD, MWh
K	varmuuskerroin	-
N	viimeinen indeksi	-

Kreikkalaiset

λ	hajoamisvakio	1/s
η	hyötysuhde	-
H	hyötysuhteen funktion integraali	-

ε	kynnysarvo	ppm, MW
Σ	makroskooppinen vaikutusala	1/cm
ν	neutroneita fissiota kohden	-
ϕ	neutronivuo	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
γ	osuus fissiotuotteista	-
τ	palama	MWd/kgU
ψ	polttoainenipun sisäinen muotokerroin	-
α	reaktiivisuuskerroin	pcm/x
θ	suurin sallittu tehon nostonopeus	MW_e/h
ρ	tiheys	kg/m^3
δ^2	varianssi	-

Alaindeksit

abs	absorptio
1 \rightarrow 2	alas-sironta
B	boori
eff	efektiivinen
fis	fissio
i, j, k, n	indeksi tai lukumäärä
I	jodi-135
J	jäähdyte
Xe	ksenon-135
smax, submax	kuumin alikanava
YA	kylmähaara
m	mittauspeitsen paikka
1	nopeiden neutroneiden ryhmä
E	nykytila / ennusteen aloituskohta
P	polttoaine
a	polttoainenippu tai -sauva
Pm	prometium-149
Sm	samarium-149
s	saturaatio

6	säätösauvojen säätävä ryhmä (ryhmä 6)
th	terminen
2	termisten neutroneiden ryhmä
tm	toimiva anturi
TTKE	TTKE:n mukainen
in	tulo

Yläindeksit

opt	optimoitu / haettu
ave	keskiarvo
K	korjattu
lim	rajoittava
ref	referenssi
S	sovitettu
*	suhteellinen
tav	tavoite
T	teoreettinen

Lyhenteet

BWR	Boiling Water Reactor
DNB	Departure from Nucleate Boiling
LO1	Loviisa-1
LO2	Loviisa-2
PWR	Pressurized Water Reactor
RA	Tuorehöyryjärjestelmä
SAM	Severe Accident Management
SPND	Self-Powered neutron detector
TTKE	Turvallisuustekniset käyttöehdot
VVER	Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor

1 JOHDANTO

Loviisan ydinvoimalaitoksella on tunnistettu tarve modernimmalle ja monipuolisemmalle työkalulle reaktiivisuustransienttien hallintaan. Niiden aikana reaktorisydämen reaktiivisuus muuttuu takaisinkytkentöjen, kuten ksenonpitoisuuden muuttumisen seurauksena. Näin ollen reaktiivisuutta täytyy kompensoida eri säätömekanismeilla, jolloin reaktorin teho saadaan pysymään hallinnassa. VVER-440:n sydämen reaktiivisuutta voidaan säätää kolmella eri tavalla ja kaikilla on omat rajoitteensa ja vaikutus lopputulemaan. Lisäksi reaktiivisuustransienttien aikana termisten marginaalien ylityksiä voi tapahtua ydinreaktorin tehonnoston yhteydessä. Termiset marginaalit ilmaisevat reaktorin termisestä tehosta johdettuja parametreja, joille on asetettu rajoitteet turvallisuusteknisissä käyttöehdoissa (TTKE). Siispä tehonnosto täytyy aina suunnitella huolellisesti etukäteen.

Tehon muuttamisen aikana ja sen jälkeen reaktiivisuuteen vaikutetaan ensisijaisesti säätösauvojen säätävällä ryhmällä, koska se on vaivaton ja nopea tapa. Jos ryhmän säätövara ei riitä, muutetaan myös jäähdytteen booripitoisuutta ja/tai sydämen tulolämpötilaa. Lämpötilaan voidaan vaikuttaa muuttamalla sekundääripiirin tuorehöyryn painetta (RA-paine). Paineen muuttaminen muuttaa sekundääripiirin kiertoveden saturaatiolämpötilaa, joka puolestaan vaikuttaa primääripiirin kylmähaaran lämpötilaan. Tehonnostoa joudutaan pitkittämään, jos reaktiivisuuden säätövara loppuu tai termisten marginaalien ennustetaan ylittyvän. Pitkittyneessä tehonnostossa sydämelle annetaan enemmän aikaa stabiloida reaktiivisuusmyrkyjen jakaumaa tehojakauman tasoittamiseksi.

Tällä hetkellä reaktiivisuutta hallitaan ennalta laskettuihin reaktiivisuuskertoimiin perustuvalla mallilla, jossa koko reaktorisydän oletetaan yhdeksi pisteeksi. Työkalu ei siis pysty mallintamaan epäsymmetrisiä reaktiivisuustransientteja. Lisäksi sillä ei voi arvioida transientin aikaisten termisten marginaalien muuttumista.

Tässä diplomityössä kehitetään uusi reaktiivisuustransienttien hallintaa avustava työkalu ReactranHelp, joka hyödyntää Loviisan VVER-440 reaktoreiden seurantaan tarkoitettua suoritusarvolaskennan ohjelmistoa RESU-98:a. Ohjelmiston käyttäminen mahdollistaa sydämen mallintamisen kolmiulotteisena ja energiariippuvana, joten termisten marginaalien ja reaktiivisuuden säädön ennustaminen transientin aikana on mahdollista. Lisäksi ennustuksen lähtötilanne voidaan päivittää vaivattomasti mittauservoilla nykytilaa vastaavaksi.

ReactranHelp:n eri funktiot validoidaan Loviisa-1:llä heinäkuussa 2020 tapahtuneen reaktiivisuustransientin mittausrvojen ja suoritusarvolaskennan tuloksien avulla. Tilanteen aiheutti säätösauvan tipahtaminen ja viipyminen ala-asennossa noin yhdeksän tuntia. Sen seurauksena sydän myrkyttyi epähomogeenisesti, mikä puolestaan sai termisen tehon painottumaan liikaa pudonneen säätösauvan lähettyvillä oleviin polttoaineniippuihin.

Luvussa 2 käydään läpi diplomityön teoreettinen tausta ReactranHelp:n toimintalogiikan ymmärtämiseksi. Toimintalogiikka puolestaan käydään läpi luvussa 3. Sen jälkeen ReactranHelp:n eri funktiot verifioidaan tai validoidaan luvussa 4. Johtopäätökset ja kehityskohdet kootaan luvussa 5 ja lopuksi luvussa 6 käydään yhteenveto diplomityöstä.

1.1 Taustaa

Nykyisin reaktiivisuuden hallinnan avustamiseen käytetään Excel-työkalua, jonka toimintaperiaate voidaan selittää kaavassa 1.1 näkyvällä mallilla. Se on johdettu oletuksesta, että kaikkien reaktiivisuuteen vaikuttavien tekijöiden summa on nolla. Malli laskee säätösauvojen säätävän ryhmän (ryhmä 6) asennon H_6 , jolla reaktori saadaan kriittiseksi.

$$H_6 = 250 \text{ cm} + \alpha_{H_6}(P_{th}, \tau)^{-1} \{ \alpha_T(P_{th}, \tau) [T_{in}^{ref} - T_{in}] + \alpha_B(\tau) C_B + \alpha_{Xe}(\tau) C_{Xe}(t) + \alpha_{P_{th}}(\tau) [1 - P_{th}^*(t)] + \alpha_{Korj} \} \quad (1.1)$$

Jäähdytteen tulolämpötilan reaktiivisuusvaikutus nimellisestä arvosta T_{in}^{ref} huomioidaan aaltosulkeiden ensimmäisellä termillä. Booripitoisuuden C_B ja ajasta riippuvan ksenonpitoisuuden $C_{Xe}(t)$ reaktiivisuusvaikutukset huomioidaan sulkeiden toisella ja kolmannella termillä. Termisen tehon P_{th} vaikutus reaktiivisuuteen nimellisestä arvosta huomioidaan taas tehokertoimen avulla (neljäs termi). Reaktiivisuusvaikutusten summa jaetaan säätävän ryhmän reaktiivisuuskertoimella α_{H_6} , jolloin lopputuloksena saadaan säätävän ryhmän asennon poikkeama yläasennosta (250 cm). Malli viritetään α_{Korj} -termillä siten, että säätävän ryhmän asento osoittaa todellista asentoa ennustushetkellä. Reaktiivisuuskertoimet palaman τ ja termisen tehon lineaarisovitteina saadaan polttoainelataussuunnittelun ohjelmistosta HEXBU-ELSI. Lisäksi kertoimia ja ksenonin käyttäytymistä on viritetty reaktiivisuustransienteista saadun kokemuksen perusteella.

Ensimmäisenä laskentaan asetetaan terminen teho ajan funktiona, joka saadaan TTKE:n tehon nostonopeuden rajoitteista. Sen jälkeen edellä kuvatun mallin avulla pyritään arvioimaan reaktiivisuuden säätö siten, että säätävän ryhmän asento pysyy TTKE:n sallimissa rajoissa. Se onnistuu tekemällä booripitoisuuden ja/tai tulolämpötilaan muutoksia nimellisistä arvoista tarvittaessa. Mikäli säätövarat loppuvat, muutetaan tehon nostonopeutta hitaammaksi.

Nykyinen työkalu on todettu toimivaksi reaktiivisuuden hallintaan normaaleissa tehonmuutoksissa, mutta vakavimpien reaktiivisuustransienttien hallintaan se ei sovellu kovin hyvin. Kokonaisen reaktorisydämen kuvaaminen yhtenä pisteenä on liian pelkistävä oletus. Tästä syystä työkalu on antanut reaktiivisuuden käyttäytymiselle hyvin epätarkkoja arvioita. Lisäksi piste ei voi mallintaa epähomogeenistä ksenonmyrkyttymistä millään tavalla. Mallista voidaan myös havaita, että siinä ei ole toiminnallisuutta, jolla termisten marginaalien ennustaminen olisi mahdollista.

1.2 Käyttäjien toivomukset ja odotukset

Uuden reaktiivisuuden hallintatyökalun käyttäjiä ovat Loviisan ydinvoimalaitoksen käyttöorganisaatio (erityisesti reaktorimestari, vuoropäälliköt ja käyttöinsinöörit), reaktori-insinöörit ja reaktorifysiikkaryhmä. Käyttäjien toivomukset ja odotukset uudelle työkalulle ovat peräisin nykyisen Excel-työkalun puutteista ja huonoista käyttökokemuksista. Niiden perusteella toteutetun vaatimusanalyysin tulokset on listattu alapuolella. Ne katsotaan tämän diplomityön tavoitteeksi.

- Tuottaa suoritusarvolaskennan tuloksia jälkikäteen mittausarvojen perusteella.
- Ennustaa kuumimman alikanavan lähtölämpötilan, lineaaritehovaran ja nipputehon kehittymisen reaktiivisuustransientin aikana riittävällä tarkkuudella.
- Arvioida reaktiivisuuden säätö: säätösauvojen säätävän ryhmän asento, RA-paineen (jäähdytteen tulolämpötila) ja primääripiirin booripitoisuus. Tavoite vaatii Excel-pohjaisen boorauksen ja laimennuksen dynamiikan kuvaavan työkalun integroimisen uuteen työkaluun.
- Arvioida reaktorin lisästabilointi tarvittaessa.

- Työkalu ohjelmoidaan Python3-ohjelmointikielellä ja sen tulee käyttää apuna suoritusarvolaskennan ohjelmistoa RESU-98:a tai lataussuunnittelussa käytettyä HEXBU-ELSI:ä.
- Työkalu on helppokäyttöinen, selkeä ja riittävän nopea.

2 TEORIA

Tämä luku sisältää diplomityön teoriaosuuden. Ensimmäisenä alaluvussa 2.1 kuvataan Loviisan ydinvoimalaitoksen VVER-440 ydinreaktoriyksiköt lyhyesti. Tarkemmin kuvataan reaktorisydämien rakenne, termiset käyttörajoitukset ja mittausinstrumentointi. Sen jälkeen alaluvussa 2.2 kerrotaan reaktiivisuudesta ja reaktiivisuustransienteista. Alaluvussa 2.3 kuvataan, kuinka reaktiivisuutta pyritään hallitsemaan eri säätömekanismilla. Alaluvussa 2.4 esitellään Loviisan reaktoreiden suoritusarvolaskennan ja lataussuunnittelun ohjelmistot RESU-98 ja HEXBU-ELSI.

2.1 Loviisan VVER-440-reaktorit

Painevesi- ja kiehutusvesireaktorit (PWR ja BWR) ovat yleisimmät reaktorityypit maailmalla. Kevyt vesi (H_2O) toimii kummissakin sekä moderaattorina että jäähdytteenä. Painevesireaktorissa lämpöenergia siirretään veden välityksellä höyrystimille, kun taas kiehutusvesireaktorissa vesi höyrystetään suoraan reaktorissa. Loviisaan ydinvoimalaitoksen reaktoriyksiköt edustavat Neuvostoliitossa suunniteltuja VVER-440-painevesireaktoreita.

Ensimmäinen yksikkö Loviisa-1 (LO1) aloitti sähkön tuottamisen valtakunnan verkkoon vuonna 1977 ja toinen Loviisa-2 (LO2) vuonna 1980. Kummatkin ydinreaktorit ovat lähes identtisiä ja niitä on modifioitu käyttöönoton jälkeen useaan otteeseen käyttökokemuksen, turvallisuusanalyysien ja käyttötapauksien perusteella. Loviisan reaktoreiden alkuperäinen suunniteltu lämpöteho 1375 MW on korotettu 1500 MW:iin ja reaktorisydämien kokoa on pienennetty. (Kyrki-Rajamäki, 2014 s. 26). Lisäksi turvallisuus on parantunut ajan saatossa: muun muassa vakavia onnettomuuksia hallinnoiva SAM-järjestelmä otettiin käyttöön 90-luvulla. (STUK, 2014).

Loviisan VVER-440 koostuu reaktorista ja kuudesta pääkiertopiiristä. Reaktorin uloin osa on paineastia, jolla on lukuisia tehtäviä kuten toimia runkona, suojata ympäristöä radioaktiiviselta säteilyltä ja aineilta sekä ylläpitää tarvittava termodynaaminen tila reaktorissa. Paineastian sisällä on reaktorin lämmönlähde eli reaktorisydän, joka tuottaa lämpöenergiaa isotoopin 235:n suhteen rikastetulla uraanilla. Lämpöenergia siirretään reaktorisydämien polttoaineniipusta primääripiirissä kiertävään jäähdytteen eli kevyeen veteen. (Kyrki-Rajamäki, 2014 ss. 25-26,38).

Yhdessä pääkiertopiirissä on kuuma- ja kylmähaara, pääkiertopumppu ja vaakahöyrystin. Paineistimia on vain yksi ja se on kytketty kahteen kuumahaaraan. Pääkiertopumput ovat kylmähaaroissa, joissa niiden aikaansaama paine-ero saa jäähdytteen kiertämään noin 8550/9000 kg/s (LO1/LO2) paineastian ja höyrystimien välillä. Noin 90 % jäähdytteestä virtaa aktiivisydämen läpi. Jäähdyte saapuu reaktorisydämeen keskimäärin lämpötilassa 267 °C ja poistuu keskimäärin lämpötilassa 300 °C (Fortum Power and Heat Oy, 2020d s. 34). Sen jälkeen kuumahaarat johdattavat jäähdytteen höyrystimille, jossa jäähdytteen lämpöenergia saa sekundääripiirin veden höyrystymään. Kylmentynyt jäähdyte johtuu takaisin kylmähaaroihin ja kierto alkaa alusta. Paineistimen avulla primääripiirissä ylläpidetään 123 bar:n käyttöpaine sekä tasataan jäähdytteen lämpötilan vaihteluista johtuva tilavuusvaihtelu. (Fortum Power and Heat Oy, 2020a ss. 7-11).

Sekundääripiiri toimii melkein kuten tavallinen höyryvoimala. Yhdessä höyrystimessä kehittyy keskimäärin 140 kg/s lämpötilaltaan 260 °C:sta kylläistä vesihöyryä, joka ohjataan höyrynkokoojaan. Järjestelmää kutsutaan RA tuorehöyryjärjestelmäksi. Höyry jatkaa tukista korkea- ja matalapaineturbiineille, jossa termien energia muutetaan mekaaniseksi energiaksi ja lopulta sähköenergiaksi turbogeneraattorilla. Turbiinien jälkeen höyry tiivistyy takaisin vedeksi merivesilauhduttimissa. Loviisan VVER-440-yksiköiden kokonaishyötysuhde on keskimäärin 35 %, josta 2 % menee omakäyttöön. (Fortum Power and Heat Oy, 2020a ss. 7-11).

2.1.1 Loviisan reaktorisydän

Reaktorisydän on kuusikulmaisten polttoaine-elementtien, suojaelementtien ja säätösauvojen absorbaattorien/polttoainejatkkeiden muodostama sylinteri, jonka halkaisija on noin 2,73 metriä ja aktiivinen korkeus kylmänä noin 2,48 metriä (Fortum Power and Heat Oy, 2020a ss. 8, 31). Polttoaine-elementtejä on nykyisin 313 kappaletta. Niistä 276 on käytön aikana kiinteästi paikallaan, joten niitä kutsutaan kiinteiksi polttoaineniipuiksi. Reaktorissa on yhteensä 37 kappaletta reaktiivisuutta hallitsevia säätösauvoja, joissa on kussakin polttoainejatkkeet. Käytännössä säätösauvat ovat käytön aikana yläasennossa, jolloin jatkeet ovat samalla tasolla muun sydämen kanssa ja absorbaattorit ulkona sydäimestä. (Fortum Power and Heat Oy, 2020a ss. 8, 31). Reaktiivisuutta hallitaan myös jäähdytteesen sekoitetulla boorihapolla (H_3BO_3) ja jäähdytteen lämpötilan kautta. Käyttöhistorian alussa neutronisäteilyn määrän todettiin olevan paineastialle liian voimakasta kummassakin yksikössä.

Rajoittavimpien suuntien säteilyannoksia saatiin pienennettyä alle kolmannekseen vaihtamalla 36 reunalla olevaa polttoainenippua suojaelementeiksi. Ne heijastavat neutroneita tehokkaasti reunoilta takaisin aktiiviseen sydämeen. (Fortum Power and Heat Oy, 2020c s. 21).

Polttoainenippujen malleja on vaihdettu useasti käytön aikana, mutta ne noudattavat kaikki hyvin samanlaista rakennetta (Hyvönen, 2021). Kiinteä polttoainenippu sekä säätösauvan polttoainejatke koostuvat polttoainesauvoista, suojakotelosta sekä ala- ja yläpäätykappaleesta. Polttoainesauvoja pitää kasassa välihilat sekä ylä- ja alahila. Jäähdyte virtaa alapäätykappaleesta polttoainenipun kotelon sisään ja poistuu yläpäätykappaleesta. Näin ollen reaktorissa ei ole merkittävästi poikittaista jäähdytteen virtausta, jolloin jäähdyte ei sekoitu polttoainenippujen välillä. Polttoainenipussa on yhteensä 126 polttoainesauvaa kolmion muotoisessa hilassa. Lisäksi keskellä on hieman sauvoja suurempi instrumentointiputki. Polttoainesauvat koostuvat uraanioksidipelleteistä (UO_2), joita ympäröi zirkonium-niobium-seoksesta valmistettu suojakuori. Se on paineistettu heliumkaasulla paremman lämmönsiirron takaamiseksi. Sauvojen väliin jääviä jäähdytteen täyttämiä kanavia kutsutaan alikanaviksi; niitä on yhteensä 294 kpl. (Fortum Power and Heat Oy, 2017a ss. 15-16, 68-69).

Nykyisin käytetään TVEL:n valmistamaa toisen sukupolven polttoainenippua, jonka uraanin keskimääräinen väkevöinti on 4,37 % kiinteiden nippujen ja 4,0 % säätösauvojen jatkeiden osalta. Lähellä polttoainenipun ulkoreunaa on kuusi kappaletta polttoainesauvoja, jotka sisältävät neutronimyrkkyä, gadoliniumia (Gd_2O_3), ylijäämäreaktiivisuuden hallitsemiseen jakson alussa. (VVER-440 Fuel cycle improvement: status and prospects, 2013 ss. 7,10). Polttoainenipulla saa korkeintaan tuottaa 57 MWd energiaa uraanikilogrammaa kohden. Tästä yksiköstä käytetään nimitystä palama. Uudessa polttoainenipussa on sekoitusvälihilat, jotka parantavat jäähdytteen sekoittumista alikanavien välillä. Näin ollen kuumimman alikanavan lähtölämpötila laskee lähemmäksi keskimääräistä. Polttoainejatkeissa ei ole tois- taiseksi käytetty sekoitusvälihiloja. (Fortum Power and Heat Oy, 2020c s. 5).

Nykyisin polttoainenipuista vaihdetaan noin neljäsosa joka vuosi. Polttoainelataukset suunnitellaan vähävuotoisiksi eli palaneimmat polttoaineniput sijoitetaan reaktorin reunoille ja tuoreemmat keskemmälle. Vähävuotoinen lataustyyli vähentää neutronivuotoa sydäimestä sekä neutroniannosnopeutta paineastiaan. (Arjoranta, 2016 s. 2).

Polttoainenippujen käytölle on asetettu termisiä rajoitteita, jotta polttoaine säilyisi ehjänä mahdollisimman hyvin normaalin käytön, käyttöhäiriöiden ja onnettomuuksien aikana. Sekoitusvälililallisen polttoainenipun termisen teho saa olla enintään 6,8 MW sekä keskimääräinen lähtölämpötila 318,5 °C LO1:n osalta. (Fortum Power and Heat Oy, 2015a ss. 3.3.2.1-2). LO2:n osalta keskimääräinen lähtölämpötila saa olla enintään 318,0 °C (Fortum Power and Heat Oy, 2017b ss. 3.3.2.1-2). Käyttöhäiriöiden analyysien perusteella yksittäisen alikanavan lähtölämpötilan rajoitus on asetettu vastaamaan veden saturaatiolämpötilaa 120,5 bar:n paineessa eli 325 °C (Fortum Power and Heat Oy, 2020d s. 5). Operaattoreita kuitenkin varoitetaan, jos alikanavan lähtölämpötila ylittää arvon 324,5 °C. Lineaariteho ilmaisee polttoainesauvan termistä tehoa aksiaalista pituusyksikköä kohden. Sen yläraja polttoainesauvalle on 325 W/cm keskimääräisen palaman ollessa nolla, mutta laskee palaman lisääntyessä. Laskentaan ja käyttäytymiseen liittyvien epävarmuuksien huomioimiseksi alikanavien entalpian nousuun on sisällytettävä varmuuskerroin 1,100 ja lineaaritehoon varmuuskerroin 1,115.

Termisen tehon nostaminen muuttaa polttoainepellettien lämpötilaa, jonka seurauksena ne voivat joutua vuorovaikutukseen suojakuoren kanssa. Näin ollen liian nopea tehonnosto voi vaurioittaa suojakuorta. Tämän ehkäisemiseksi TTKE:ssä on asetettu nostonopeuden rajoitteita, jotka riippuvat ajasta viimeisimpään tehon laskuun. Lisäksi vaihtolatauksen jälkeen noudatetaan sille tarkoitettuja nopeusrajoituksia. Tehon nostonopeuden rajoitukset ovat kummallekin laitosyksikölle samat ja ne näkyvät liitteen I taulukossa I.1. Tehon nostaminen on hitainta vaihtolatauksen jälkeen ja nopeinta mikäli tehon laskusta on kulunut alle tunti. Nollateholta teholle 15 % saadaan jokaisessa tilanteessa nousta gradientilla 300 MW/h generaattoritehon mukaan. Siitä eteenpäin nopeudet ovat paljon pienempiä. Lisäksi reaktoria täytyy välillä stabiloida tilanteesta riippuen 1 - 12 tuntia, jotta polttoainepellettien ja suojakuoren väliset jännitteet ehtivät vaimenemaan. (Fortum Power and Heat Oy, 2015a ss. 3.3.2.1-3-4).

Loviisan VVER-440-yksiköitä mitataan monella tapaa reaktorisydämen sisältä ("in-core"-mittaukset) että ulkoa mahdollisimman turvallisen operoinnin takaamiseksi. Mittauksia kerätään PTK-nimiselle palvelimelle ja niitä käytetään muun muassa reaktorin suoritusarvotarkennassa. Laskennassa teoreettisesti lasketut reaktorisydämen teho- ja vuojaumat sovitetaan neutronivuo- ja lämpötilamittauksiin. Tätä kautta operaattori saa monipuolista tietoa

reaktorin tilasta. (Fortum Power and Heat Oy, 2019b ss. 1,4). Suoritusarvolaskennasta kerrotaan lisää alaluvussa 2.4.

Neutronivuota mitataan sekä kiinteiden polttoainenäppujen instrumentointiputkeen menevillä SPND¹-anturipeitsillä (YQ20X) että paineastian ulkopuolelle asennetuilla antureilla. Instrumentointiputkeen sijoitetut rhodium-anturit ovat kiinni peitsissä neljällä eri aksiaalisella tasolla. Lisäksi peitsissä on taustakaapeli, joka mittaa taustan gammasäteilyä. SPND-anturi tuottaa virtasignaalin, kun rhodiumelementtiin osuva neutroni saa aikaan elektronin irtoamisen. Elektronit kerätään anturin kuorella eli kollektorilla. Virtasignaali käännetään keskimääräiseksi nopeaksi neutronivuoksi SPND-tulkintamallilla. Mallissa virtasignaalin arvo jaetaan kokonaisherkkyydellä, joka kertoo neutronivuon sekä virtasignaalin välisen suhteen. (Kuusisto, 2002).

Polttoainenäppujen keskimääräistä lähtölämpötilaa mitataan termopareilla (YQ30T), jotka ovat viety ympäri sydäntä suojatuilla läpivientiyksiköillä. Yksiköitä on yhteensä 12 kappaletta ja jokaisessa yksikössä on noin 18 termoparia. Osa termopareista mittaa nykyisin suojaelementtien lähtölämpötilaa. Termopareista 28:aa käytetään suoraan reaktorin suojausjärjestelmässä, 24 kappaletta osallistuu kiehumisvaravalvontaan ja 4 kappaletta käytetään vakavan onnettomuuden hallintajärjestelmässä (SAM-järjestelmä). Reaktorin suojausjärjestelmään kuuluu myös jäähdytteen lämpötilan mittaus reaktorikannen alapuolella sekä pääkierrotopiirien korkeudella. Kummissakin mittauksissa on kuusi termoparia. (Fortum Power and Heat Oy, 2019c).

Lisäksi reaktorisydämien suoritusarvolaskenta käyttää monia muita olennaisia mittauksia. Niitä ovat muun muassa kylmä- ja kuumahaarojen lämpötilan ja jäähdytteen massavirtauksen sekä primääripiirin paineen mittaukset. (IAEA, 1994 s. 64). Booripitoisuutta mitataan jatkuvakäyttöisillä mittauslaitteistoilla, joiden mittausarvoja verrataan laboratoriotuloksiin tarkkuuden varmistamiseksi (Taipale, 2009 s. 2).

2.2 Reaktiivisuus

Tarkastellaan seuraavaksi neutroniketjureaktiota reaktorisydämessä sijaitsevassa kontrollitilavuudessa. Yhdestä ²³⁵U:n fissioreaktiosta vapautuu noin 2 - 3 neutronia, mutta toisaalta se

¹ SPND = Self Powered Neutron Detectors

tarvitsee yhden neutronin tapahtuakseen. Muita neutroneita kuluttavia reaktioita ovat kaapausreaktio ja hiukkasemissio. Kontrollitilavuus voi myös vuotaa tai saada neutroneita ulkopuolelta. Lyhyesti sanottuna neutroneiden määrän muutokseen vaikuttaa siis sekä fissioreaktioiden suhde muihin neutroneita kuluttaviin reaktioihin että neutroneiden vuotaminen. (Weston, 2018 ss. 33-40).

Efektiivinen kasvutekijä (k_{eff}) kuvaa neutroneiden syntymisnopeutta suhteessa häviämisenopeuteen heijastetussa reaktorissa. Neutroneiden määrä sydämessä pysyy vakiona kasvutekijän arvon ollessa yksi ($k_{\text{eff}} = 1$), jolloin puhutaan kriittisestä reaktorista. Neutroneiden määrällä on verrannollisuus fissioreaktioiden määrään. Näin ollen myös fissioista vapautuva energiamäärä ajan suhteen on vakio. Kun kasvutekijä on arvoltaan suurempi kuin yksi ($k_{\text{eff}} > 1$), reaktori on ylikriittinen ja termien teho nousee. Vastaavasti kasvutekijän arvon ollessa alle yhden ($k_{\text{eff}} < 1$) reaktori on alikriittinen ja termien teho laskee. (Weston, 2018 s. 37).

Osa neutroneista vapautuu fissiotuotteiden hajoamisen seurauksena, joten vapautumiseen kuluu enemmän aikaa fissioreaktiosta. Tämän takia niitä kutsutaan viivästyneiksi neutroneiksi. Välittömästi fissiossa vapautuvia neutroneita kutsutaan taas kerkeiksi. Viivästyneet neutronit tekevät ydinreaktorista hallittavan, sillä ne pidentävät neutroneiden keskimääräistä vapautumisaikaa. Reaktori on kerkeästi ylikriittinen, jos reaktori pysyy kriittisenä ainoastaan kerkeillä neutroneilla ($k_{\text{eff}}(1 - \beta_{\text{eff}}) > 1$, β_{eff} viivästyneiden osuus kaikista neutroneista). Kerkeää ylikriittisyyttä halutaan ehdottomasti välttää, sillä tässä tilassa reaktorin teho kasvaa hallitsemattoman nopeasti. (Weston, 2018 s. 151).

Reaktiivisuus (r) on kasvutekijän suhteellinen ero kriittiseen reaktoriin nähden. Kasvutekijä poikkeaa yleensä yhdestä vain vähän, jolloin myös reaktiivisuus on arvoltaan hyvin pieni. Siispä helpomman hahmottamisen vuoksi reaktiivisuutta käsitellään yleensä sadastuhannesosina ($\text{pcm} = 10^{-5}$) tai suhdelukuna viivästyneiden neutroneiden osuuteen eli "dollareina" tai "sentteinä" ($1 \$ = r/\beta_{\text{eff}}$, $1 \text{ c} = 0,01 \$$). (Reuss, 2008 s. 121).

Reaktiivisuuteen vaikuttavat sydämen materiaalien lämpötila, neutronimyrkyt ja polttoaineen palama. Nämä ovat taas riippuvaisia reaktorin termisestä tehosta. Näin ollen termisen tehon muuttaminen johtaa reaktiivisuuden muuttumiseen ja sillä on vaikutus takaisin termiseen tehoon. Tästä ilmiöstä puhutaan nimityksellä takaisinkytkentä. Reaktorimallin

suunnittelussa sekä ydinteknisessä lataussuunnittelussa varmistetaan, että tehon nostamista seuraavat takaisinkytkennät johtavat reaktiivisuuden pienentymiseen. Näin ollen tehon kasvu rajoittaa tehon kasvunopeutta ja reaktori käyttäytyy stabiilisti. (Fortum Power and Heat Oy, 2020c s. 5).

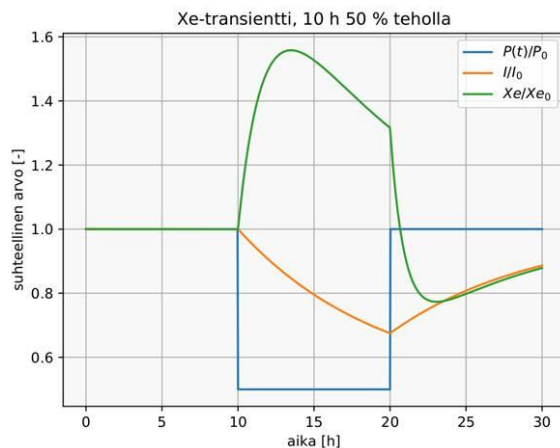
Reaktiivisuus voidaan laskea reaktiivisuuskertoimien avulla. Ne määritellään reaktiivisuuden osittaisderivaattana muuttuvan tilaparametrin, kuten esimerkiksi lämpötilan tai booripitoisuuden suhteen. Reaktiivisuuskertoimet eivät ole aina vakioita, vaan voivat muuttua käyttöjakson aikana. Esimerkkinä kaavassa 2.1 on jäähdytteen lämpötilan suhteen määritelty reaktiivisuuskerroin.

$$\alpha_{T_j} = \frac{dr}{dT_j} \quad (2.1)$$

Nopein reaktiivisuusvaikutus johtuu välittömästä polttoaineen lämpötilan muutoksesta kun termistä tehoa muutetaan. Merkittävin tekijä on ^{238}U :n absorptiovaikutusalan muuttuminen eli Doppler-ilmiö. Ilmiössä absorptiovaikutusalan resonanssiipiikit laajenevat siten, että neutroni kaappautuu suuremmalla todennäköisyydellä hidastumisen aikana. Polttoaineen kuumentuminen vaikuttaa siis alentavasti reaktiivisuuteen. (Lamarsh;ym., 2013 ss. 365-371). Reaktiivisuuteen vaikuttaa myös polttoaineen lämpölaajeneminen, koska atomitiheyden pienentyminen johtaa makroskooppisen absorptiovaikutusalan pienentymiseen (Oka, 2014 ss. 26-27). Loviisan VVER-440-reaktoreiden polttoainelämpötilan reaktiivisuuskerroin täydellä teholla on tyypillisesti jakson alussa $-3,2 \text{ pcm}/^\circ\text{C}$ ja lopussa $-2,7 \text{ pcm}/^\circ\text{C}$. Nollatehotilassa kummatkin ovat noin $0,1 \text{ pcm}/^\circ\text{C}$ alempia. (Fortum Power and Heat Oy, 2020c s. 15).

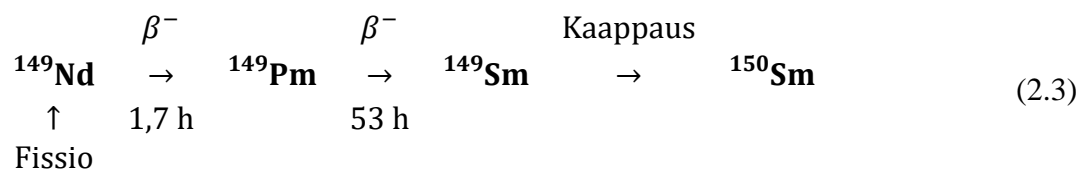
Seuraavaksi nopein reaktiivisuusvaikutus johtuu jäähdytteen eli moderaattorin lämpötilan ja siitä seuraavan tiheyden muuttumisesta. Reaktiivisuusvaikutus on seuraus kolmesta eri tekijästä, joita ovat moderaattorin neutroneita absorboivan, hidastavan ja heijastavan ominaisuuksien muuttuminen. Moderaattorin lämpötilan noustessa tiheys laskee, jonka seurauksena sen makroskooppinen absorptiovaikutusala pienenee. Booripitoisuus vaikuttaa voimakkaasti tähän tekijään, sillä boorin tiheys muuttuu moderaattorin tiheyden muuttuessa. Toinen moderaattorin reaktiivisuusvaikutuksen tekijä on neutronien energiaspektrin koveneminen hidastumisen vähetessä, jolloin neutroneita absorboituu enemmän nopeina kuin termisinä.

Kuvassa 2.1 näkyy jodin ja ksenonin käyttäytyminen tilanteessa, jossa reaktorin teho laskeaan ensin nimellisestä tilasta 50 %:iin ja 10 tunnin päästä takaisin nimelliseen tilaan. Nimellisessä tilassa ksenon ja jodi ovat tasapainossa, eli syntymis- ja häviämisenopeudet ovat yhtä suuret. Neutronivuon pienentyessä ksenonin häviämisenopeus kaappausreaktioina pienenee. Toisaalta ksenonia syntyy vielä jodin hajoamisena, jolloin sen pitoisuus nousee tasapainotilasta. Tehon laskemisesta seuraa reaktiivisuuden laskua, joten reaktiivisuusvaikutus on negatiivinen. Noin kolmen tunnin päästä ksenonin pitoisuus kuitenkin kääntyy laskuun, sillä jodin pitoisuus on ehtinyt laskemaan alhaiseksi. Kun tehoa taas nostetaan, ksenonin pitoisuus lähtee jyrkkään laskuun ja laskee alkuperäisen tasapainotilan alapuolelle. Tehon nostosta seuraa reaktiivisuuden lisäys, joten reaktiivisuusvaikutus on positiivinen. (Lamarsh;ym., 2013 ss. 382-383).



Kuva 2.1. Ksenonin ja jodin käyttäytyminen tehon muutoksien seurauksena (Lehtinen;ym., 2020).

Samarium (^{149}Sm) on ksenonin jälkeen merkittävin reaktiivisuusmyrkky. Samariumin termien kaappausvaikutusala on 41 000 b, mutta sen käyttäytyminen on ksenoniin verrattuna yksinkertaisempi. Kaavassa 2.3 näkyy samariumiin liittyvä hajoamisketju. Siitä nähdään, että samariumia syntyy β^- -hajoamisketjuna prometiumin (^{149}Pm) kautta neodyymistä (^{149}Nd), joka on fissiotuote. Samarium on stabiili, joten sitä voi hävitä ainoastaan kaappausreaktioiden seurauksena.



Hajoamisketjusta seuraa, että samariumpitoisuus muuttuu merkittävästi vain tuoreessa polttoaineessa, koska siinä ei ole samariumia ennestään. Toisaalta samariumin pitoisuus pääsee nousemaan tasapainon yläpuolelle, mikäli reaktori pysyy sammuneena monia päiviä. (Lamarsh;ym., 2013 ss. 383-386).

Hitaat reaktiivisuuden muutokset johtuvat muun muassa fissiilin aineen vähentymisestä polttoaineen palaman kasvaessa. Reaktorin polttoainelataus suunnitellaan siten, että jakson alussa on riittävästi ylijäämäreaktiivisuutta, jotta reaktori ei menisi alikriittiseksi hetken käytön jälkeen. Sen suunniteltu määrä riippuu siis tavoitellun jakson pituudesta. Sitä kompensoidaan reaktiivisuuden säätöjärjestelmillä sekä polttoaineeseen sekoitetulla palavalla absorbaattorilla. Jakson edetessä kompensointia vähennetään, kunnes kaikki ylijäämäreaktiivisuus on käytetty. (Lamarsh;ym., 2013 ss. 376-393). Venytysajolla voidaan kuitenkin vielä pidentää jaksoa laskemalla termistä tehoa ja jäähdytteen tulolämpötilaa. Näin ollen reaktiivisuus lisääntyy takaisinkytkentöjen avulla.

Normaalissa tehonnostossa tapahtuu reaktiivisuuden muutoksia takaisinkytkentöjen seurauksena. Reaktorille on kuitenkin mahdollista tapahtua vakavampi transientti, jonka voi laukaista vahingollinen reaktiivisuuden lisäys tai vähennys. Reaktiivisuuspoikkeamat voidaan luokitella odotettavaksi oleviksi käyttöhäiriöiksi sekä luokan 1 ja 2 onnettomuuksiksi vakavuuden perusteella. Onnettomuuksiksi luokitellut transientit ovat hyvin nopeita ja voimakkaita, joten ne vaativat reaktorin hätäsulun. Sellaisia ovat esimerkiksi säätösauvan sinkoutumisesta ja booripitoisuuden ylilaimenemisesta seuraavat transientit. (Fortum Power and Heat Oy, 2020b). Säätösauvan sinkoutumisessa sydän voi tulla paikallisesti kerkeästi ylikriittiseksi, jolloin termisen teho nousee nopeasti. Se puolestaan johtaa polttoaineen lämpötilan kasvamiseen, jolloin Doppler-ilmion reaktiivisuusvaikutus tuo termisen tehon lopulta alas. (Diamond;ym., 2002 s. 1). Odotettavaksi olevista käyttöhäiriöistä seuraavat transientit ovat helpommin hallittavissa. VVER-440:n tapauksessa niitä ovat säätösauvan tipahdaminen tai kontrolloimaton ylösajo sekä suunniteltu lämpötila- tai boorihäiriöisen kiertopiirin kytkeminen reaktoriin. (Fortum Power and Heat Oy, 2020b).

Käyttöhäiriö voi johtaa sydämen epähomogeeniseen myrkyttymiseen, mikäli neutronivuo voimistuu tai hiipuu paikallisesti. Esimerkiksi yksittäisen säätösauvan tipahdaminen saattaa reaktorin paikallisesti alikriittiseksi ja laskee sauvan viereisten polttoainepölvien tehoa. Samalla reaktorin termistä tehoa joudutaan laskemaan. Säätösauvan ja reaktorin tehon

nostamisen jälkeen matalammalla teholla olleissa polttoainenipuissa voi tapahtua voimakas ksenonin aliheilahdus. Nippujen reaktiivisuuden lisääntyessä sydämen kokonaisteho painottuu enemmän niihin. (Lehtinen;ym., 2020).

Pienen reaktorisydämen tapauksessa epähomogeeninen ksenonjakauma tasoittuu itsestään, kun sen aikaansaama tekijä poistetaan. Ksenonpitoisuudet nipuissa asettuvat lopulta neutronivuota vastaaviin tasapainoihin. Suuressa reaktorisydämessä välimatkat ovat kuitenkin niin pitkiä, että ksenon- ja tehojakaumat voivat jäädä oskilloimaan sydämen puolelta toiselle. (Oka;ym., 2013 s. 126). Sitä ei ole havaittu tapahtuvan VVER-440:n reaktorisydämessä (Kaloinen;ym., 1986 s. 1).

2.3 Reaktiivisuuden säätö

Reaktiivisuuden säädöllä on kaksi tehtävää. Ensimmäinen on reaktorin pitäminen vakioteholla, jolloin reaktiivisuus ylläpidetään nollassa. Toinen tehtävä on tehon hienovarainen muuttaminen tai nopea laskeminen, kuten hätäsulku. Tehoa muuttaessa reaktiivisuus pidetään positiivisena tai negatiivisena riippuen kumpaan suuntaan tehoa halutaan muuttaa. (Lamarsh;ym., 2013 s. 348).

Redundanttisuuden kannalta reaktorissa täytyy olla monta erilaista reaktiivisuutta rajoittavaa ja säätävää järjestelmää. Niiden vikaantuminen tai operaattorin virhe ei saa aiheuttaa kohtuutonta vauriota sydämelle tai ympäristölle. (IAEA, 2005). VVER-440:n reaktiivisuutta säädetään pääsääntöisesti kolmella eri keinolla, joita ovat säätösauvojen liikuttelu, jäähdytteen booripitoisuuden muuttaminen ja tulolämpötilan muuttaminen (Fortum Power and Heat Oy, 2019a s. 16).

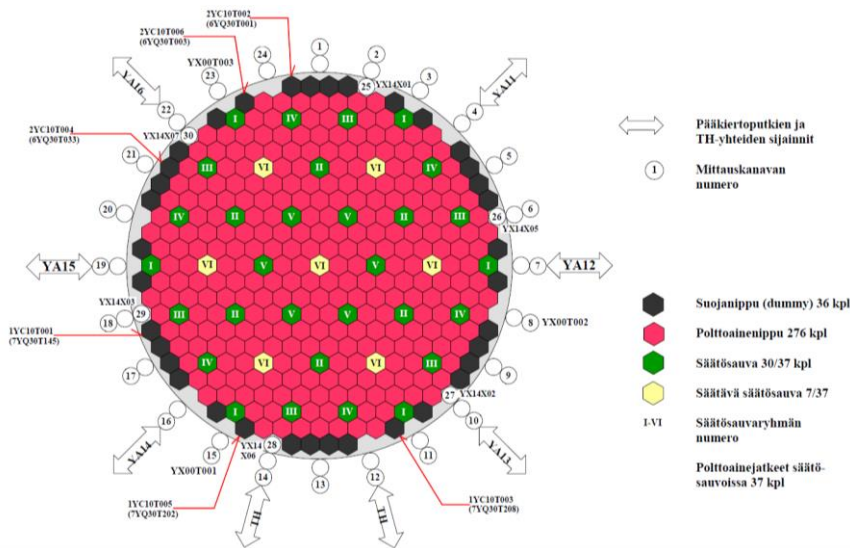
VVER-440:ssä reaktiivisuuden ylläpitoon ja tehon muuttamiseen käytetään ensimmäisenä säätösauvoja. Esimerkiksi reaktiivisuustransientin aikana voidaan reaktiivisuutta kompensoida säätösauvoilla, jotta teho käyttäytyy operaattorin haluamalla tavalla. Lisäksi niillä on tärkeä tehtävä reaktorin nopean sammutuksen eli hätäsulun aikana. Säätösauvat tiputetaan pohjaan asti omalla massallaan gravitaation avulla, jolloin reaktorista tulee nopeasti alikriittinen. (Fortum Power and Heat Oy, 2019a).

Säätösauvat koostuvat absorbaattori-elementistä sekä polttoainejatkeesta. Absorbaattori-elementti muistuttaa ulkoa polttoainenippua mutta sen sisällä on booriteräsholkki, joka hidastaa

ja absorboi neutroneita. Elementit ovat tangossa kiinni siten, että absorbaattori-elementti sijaitsee jatkeen yläpuolella. Tanko on kiinnitetty säätösauvakoneistoon, joka sijaitsee sydämen yläpuolella paineastian kannessa. (IAEA, 1994 s. 47). Koneisto on kotelossa, joka on paineistettu reaktorin kanssa lähes samaan paineeseen. Ohjaukoneiston sähkömoottori toimii kolmella eri tavalla. Pitoasennossa säätösauvaa pidetään samalla korkeudella tasavirran avulla. Normaalisissa ajoissa sauvan asentoa ohjataan taajuusmuuttajalta saadulla vaihtovirralla. Häätösulussa virransyöttö katkaistaan kokonaan, jolloin sauva pääsee tipahtamaan omalla painollaan mutta säätösauvakoneiston jarruttamana. Säätösauvojen nopeus normaalissa säädössä on 2 cm/s ja häätösulussa putoamisaika on alle 13 sekuntia. (Fortum Power and Heat Oy, 2019a ss. 10, 13).

Säätösauvan ollessa yläasennossa absorbaattori-elementti on kokonaan sydämen yläpuolella ja polttoainejatke sydämessä kiinteiden polttoainenippujen tasolla. Ala-asennossa absorbaattori-elementti on sydämen tasolla ja polttoainejatke sydämen alapuolella. (Kyrki-Rajamäki, 2014 s. 36). Mekanismi antaa enemmän säätövaraa sauvalle, koska polttoainejatkeen poistuminen sydäimestä vähentää reaktiivisuutta. Lisäksi absorbaattori-elementin asettuminen sen paikalle vähentää sitä entisestään.

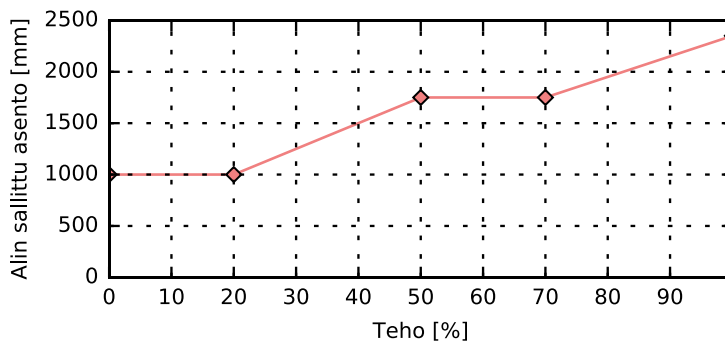
Säätösauvat on jaettu kuuteen ryhmään, joissa on jokaisessa kuusi säätösauvaa ryhmää 6 lukuun ottamatta, jossa niitä on seitsemän kappaletta. Ryhmää 6 käytetään käytön aikaisessa reaktiivisuuden säädössä, joten siitä käytetään nimitystä säätävä ryhmä. Muut ryhmät pysyvät yläasennossa normaalikäytön aikana. Kaikkia säätösauvoja käytetään yhdessä häätösulkuun. (Fortum Power and Heat Oy, 2019a ss. 10-12). Lajittelu ja sijoittelu on tehty siten, että säätösauvat ovat eri puolilla sydäntä, mutta symmetrisesti. Siten säätösauvoilla pystytään vaikuttamaan reaktiivisuuteen koko sydämen alueella ja vaikutus neutronivuohon on mahdollisimman tasainen. Toisiaan liian lähellä olevat säätösauvat johtavat varjostumiseen eli paikallisesti neutroneita on niin vähän, ettei toisesta säätösauvasta saada enää hyötyä. (IAEA, 2005 ss. 21, 26). Yksittäisen säätösauvan asento ei saa erota ryhmästä yli 25 cm, koska poikkeama voi johtaa neutronivuojakauman vinoutumiseen palaman lisääntyessä (Fortum Power and Heat Oy, 2015a ss. 3.3.2.5-1). Säätösauvojen sijainnit ja ryhmittely näkyy sydänkarttakuvassa 2.2.



Kuva 2.2. Sydänkartta, johon merkitty säätösauvaryhmät.

Säätösauvojen asentoa mitataan koneiston sähkömoottorin jännitettä mittaamalla. Säätösauvan ollessa yläasennossa anturi ilmaisee arvon 250 cm ja ala-asennossa arvon 0 cm. Mittauksen tarkkuus on 0,3 cm. (Fortum Power and Heat Oy, 2019a ss. 4, 12-13).

Reaktiivisuuden säätövara suunnitellaan siten, että yhden säätösauvan sinkoutuminen sydäimestä ei aiheuta liian suurta reaktiivisuuden lisäystä (IAEA, 2005 s. 20). Toisaalta tarpeeksi suuri sammutusvara on taattava. Toisin sanoen säätösauvojen on yhdessä riitettävä saattamaan täydellä teholla operoiva reaktori riittävän alikriittiseksi, vaikka tehokkain säätösauva juuttuisi ylös. (Oka, 2014 s. 37). Lisäksi säätösauvojen asento vaikuttaa tehotiheyteen painottamalla termistä tehoa alemmas sydämeen. Siispä säätävä ryhmä alemmassa asennossa voi laskea lineaaritehovaraa pienemmäksi. (Brik;ym., 1998 ss. 313-316). Näin ollen TTKE:ssa on asetettu säätösauvojen säätävälle ryhmälle alin raja tehotason mukaan, joka näkyy kuvassa 2.3. Rajoitus koskee tehokäytön lisäksi myös käynnistystilaa. Nollateholla raja on alimmillaan 100 cm korkeudella. Vastaavasti nimellisteholla se on ylimmillään, 235 cm korkeudella. (Fortum Power and Heat Oy, 2015a ss. 3.3.2.5-1-4). Lisäksi säätävän ryhmän jatkeeksi ei saa asettaa tuoretta polttoainetta.

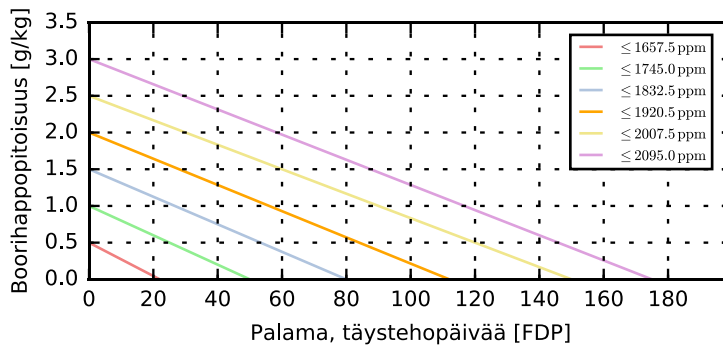


Kuva 2.3. TTKE:n mukainen säätävän ryhmän alin sallittu asento termisen tehon funktiona. (Fortum Power and Heat Oy, 2015a ss. 3.3.2.5- 4).

Booraus- ja laimennusjärjestelmää käytetään hitaissa reaktiivisuusmuutoksissa, sammutusmarginaalin varmistamiseen hätäsulun jälkeen sekä muiden säätöjärjestelmien varan loppuessa. Yhdessä palavien absorbaattorien kanssa boorilla säädetään ylijäämäreaktiivisuutta jakson palaman lisääntyessä siten, että säätävää ryhmää voidaan pitää yläasennossa. Siten tehojakauma pysyy tasaisempana ja sammutusmarginaali suurempana. Jakson alussa primääripiirin booripitoisuus² on korkeimmillaan, kun taas loppua kohden sitä laimennetaan aina lähelle nollaan saakka. Jakson alun kriittinen booripitoisuus määrittyy lataussuunnitelun yhteydessä. Kuumavalmiudessa ja seisokitilanteissa booripitoisuuden on oltava suurempi, jotta reaktori pysyy alikriittisenä huomattavasti kylmemmissäkin lämpötiloissa ja ilman ksenonia. (Lamarsh;ym., 2013 ss. 363, 393).

Primääripiiriin syötetään vahvaa boorihappoa (40 g/kg) suoraan tai kaasunpoistimen kautta, kun booripitoisuutta halutaan kasvattaa. Laimentaessa piiriin syötetään kaasunpoistimen kautta laimennusvesiliuosta, joka sisältää myös boorihappoa. TTKE:ssa on määritelty laimennusvesiliuoksen alin sallittu boorihappopitoisuus, joka laskee lineaarisesti jakson palaman funktiona. Raja määräytyy jakson alun kriittisen booripitoisuuden mukaan. Rajoituksella pyritään estämään primääripiirin ylilaimeneminen, mikäli laimennusvesiliuosta pääsee primääripiiriin hallitsemattomasti. Noin jakson puolivälin jälkeen voidaan käyttää puhdasta vettä laimennukseen, koska primääripiirin booripitoisuus on jo niin alhainen. TTKE:n rajoitukset näkyvät kuvassa 2.4.

² Booripitoisuuden yksikkö on ppm (parts per million) ja boorihappopitoisuuden g/kg. Boorihappopitoisuus voidaan muuttaa booripitoisuudeksi kertomalla se luvulla 175.



Kuva 2.4. TTKE:n mukainen pienin sallittu laimennusveden pitoisuus palaman funktiona. Käyrä määräytyy jakson alun kriittisen booripitoisuuden mukaan.

Teoriassa reaktorin ja turbiinin välistä lämmönsiirtoa voidaan pitää tasapainossa kahdella eri ohjelmalla: pitämällä jäähdytteen keskilämpötila (T_m -ohjelma) tai tuorehöyryn paine (p_s -ohjelma) vakiona. Näistä ensimmäisessä tuorehöyryn painetta muutetaan reaktorin tehon muuttuessa. Tuorehöyryn paine määrittää sekundääripiirissä kiertävän veden saturaatiolämpötilan. Näin ollen se määrittää lämpötilan, johon primääripiiriin vesi jäähtyy höyrystimessä eli toisin sanoen sydämen tulolämpötilan. p_s -ohjelmassa taas reaktorin tehoa muutetaan turbiinin tehon muuttuessa siten, että tuorehöyryn paine pysyy vakiona. Todellisuudessa näitä kumpaakin ohjelmaa käytetään yhdessä, mutta Loviisan VVER-440-reaktorit ovat enemmän p_s -ohjelma -painotteisia normaalikäytössä. (Kyrki-Rajamäki, 2014 ss. 1-4). Tehonnostossa tästä ohjelmasta voidaan kuitenkin poiketa ja tuorehöyryn painetta (RA-paine) voidaan käyttää reaktiivisuuden säätöön. Sydämen tulolämpötila muuttuu, joka puolestaan muuttaa jäähdytteen keskilämpötilaa. Reaktiivisuutta voidaan lisätä laskemalla ja vähentää nostamalla RA-painetta.

RA-paineen säädön yläraja on 47 bar, sillä turbiinin ohitus laukeaa siinä paineessa. Alaraja on 41 bar, koska turbiinin tehoa joudutaan puolestaan laskemaan sen jälkeen. (Vainio;ym., 2020 s. 7). Toisaalta turbiinin hyötysuhde laskee ja kosteus lisääntyy turbiinin viimeisissä vaiheissa jo ennen alarajaa.

2.4 Loviisan reaktorisydämien laskenta

Tässä alaluvussa kuvataan Loviisan VVER-440-reaktoreiden lataussuunnittelun ohjelmisto HEXBU-ELSI ja sydämen termisten marginaalien valvontaan käytetty ohjelmisto RESU-98. HEXBU-ELSI on yhdistelmä kahdesta ohjelmasta: HEXBU-3D:stä ja ELSI-1440:stä.

Ensimmäinen laskee reaktorin nopean ja termisen neutronivuojakauman kolmiulotteisesti ja toinen käyttää laskettuja tuloksia sauvatehojakauman rekonstruointiin kaksiulotteisesti. RESU-98 käyttää HEXBU-ELSI:ä ja mittauksia sydämen simulointiin. Tärkeä ominaisuus on neutronivuo- ja tehojakauman sovitustoiminto, jolla simuloituja teoreettisia tuloksia korjataan mittausten perusteella tarkemmaksi.

2.4.1 HEXBU-ELSI

HEXBU-3D on sydänsimulaattori, joka käyttää nodaalimenetelmää diffuusioyhtälöiden ratkaisemiseen. Neutroneilla oletetaan olevan vain kaksi ryhmää energian perusteella: nopeiden ja termisten neutroneiden ryhmä. Ryhmien rajaenergiaksi oletetaan 0,625 eV. Neutronivuot ratkaistaan kuusikulmaisten prismojen muotoisissa noodeissa kymmenellä aksiaalisella tasolla. Ne noudattavat siis VVER-440:n polttoaineen geometriaa. Yhdessä noodissa oletetaan vallitsevan koko noodille homogenisoidut 2-ryhmävakiot, eli kummankin energiaryhmän vaikutusalat ja diffuusiovakiot. (Kuusisto, 2007 ss. 2-3). Neutronivuo- ja tehotiheysjakaumien ratkaisemisen jälkeen sydämen termohydraulinen tila lasketaan erillisellä ratkaisijalla, jonka ansiosta ryhmävakioille saadaan uudet lähempänä oikeaa sydämen tilaa vastaavat arvot. Iterointia ratkaisijoiden välillä jatketaan, kunnes ratkaisu ei enää muutu merkittävästi. Ohessa saadaan tilamuuttujista riippuvien takaisinkytkentöjen vaikutus reaktiivisuuteen. Lisäksi ksenonin, samariumin ja palaman vaikutukset neutronifysikaalisiin ominaisuuksiin huomioidaan. Diffuusioyhtälöiden ratkaisussa ei ole aikariippuvuutta, vaan ne ratkaistaan tasapainolaskuina. (Kaloinen, 1992 ss. 1, 5, 28).

Diffuusioyhtälö johdetaan neutroneiden kuljetusyhtälöstä. Kuljetusyhtälö kuvaa neutronin liikettä, vapautumista, vuotamista ja energian muuttumista lähes täydellisesti. Siinä on liikaa muuttujia nykypäivän laskukapasiteetille, kun otetaan vielä huomioon neutronien lukematon määrä reaktorisydämessä. Näin ollen yhtälöä yksinkertaistetaan poistamalla neutroneiden kulmariippuvuus sekä olettamalla jatkuvan energiaspektrin sijasta diskreettejä energiaryhmiä. Kulmariippuvuus poistetaan Fickin lailla, jossa oletetaan neutronivirran suuruuden riippuvan vain neutronivuon ϕ gradientista sekä diffuusiokertoimesta D , joka kuvaa materiaalin ominaisuutta kuljettaa neutroneita. Oletuksena on kuitenkin, että neutronivuolla ei ole liian jyrkkiä gradientteja. (Oka, 2014 ss. 50, 71). HEXBU-3D:n nopea ja terminen diffuusioyhtälö näkyy kaavoissa 2.4 ja 2.5.

$$-D_1 \nabla^2 \phi_1 + (\Sigma_{\text{abs}1} + \Sigma_{1 \rightarrow 2}) \phi_1 = \frac{1}{k_{\text{eff}}} [v_1 \Sigma_{\text{fis}1} \phi_1 + v_2 \Sigma_{\text{fis}2} \phi_2] \quad (2.4)$$

$$-D_2 \nabla^2 \phi_2 + (\Sigma_{\text{abs}2}^0 + C_B \Sigma_{\text{abs}B}) \phi_2 = \Sigma_{1 \rightarrow 2} \phi_1. \quad (2.5)$$

Kaavoissa alaindeksit 1 ja 2 tarkoittavat nopeaa ja termistä ryhmää. Neutronien liikkuminen huomioidaan diffuusioyhtälöissä ensimmäisellä termillä, häviäminen toisella ja syntyminen kolmannella (yhtälön oikealla puolella). Makroskooppisella absorptiovaikutusalalla $\Sigma_{\text{abs}1}/\Sigma_{\text{abs}2}^0$ huomioidaan neutroneiden häviäminen absorptioreaktioiden seurauksena, mutta termisessä ryhmässä boorin absorptio on erotettu omaksi termiksi pitoisuuden suhteen $C_B \Sigma_{\text{abs}B}$. Lisäksi nopeasta ryhmästä neutroneita häviää hidastumisen seurauksena, mikä otetaan huomioon alas-sironnan vaikutusalalla $\Sigma_{1 \rightarrow 2}$. Nopeiden ja termisten neutronien aiheuttamat fissioreaktiot synnyttävät uusia neutroneita suoraan nopeaan ryhmään. Kertoimella v otetaan huomioon vapautuvien neutronien lukumäärä fissioreaktiosta, jonka makroskooppinen vaikutusala on $\Sigma_{\text{fis}1}/\Sigma_{\text{fis}2}$. Fissioreaktioista ei oleteta syntyvän termisiä neutroneita, joten termisen ryhmän yhtälön oikealla puolella on vain nopealta ryhmältä hidastuvien neutronien termi. Efektiivisen kasvutekijän k_{eff} käänteisarvo ja / tai booripitoisuus kompensoivat diffuusioyhtälöt tasapainoon eli kriittiseksi. (Siltanen;ym., 1974 ss. 12-16).

Nodaalimenetelmässä neutronivuojakaumat mallinnetaan muotofunktioilla noodien sisällä ja reunoilla. Muotofunktioiden käyttäminen mahdollistaa sydämen neutronivuojakauman laskemisen harvalla hilalla ja siten laskuajallisesti tehokkaasti. Niiden käyttö on mahdollista, koska neutronifysikaalisilta ominaisuuksiltaan homogenisoidun noodin sisäinen neutronivuojakauma riippuu ainoastaan sen reunaehdoista. Noodien väliset reunaehdot ovat neutronivuojakauman ja -virran jatkuvuusehtoja. (Siltanen;ym., 1974 ss. 17-32). Sydämen reunalla heijastimesta palaava neutronivirta lasketaan nykyisin ennalta määritettyjen albedomatriisien avulla. Albedo kuvaa heijastimesta palaavan nettoneutronivirran suhdetta lähtevään nettoneutronivirtaan. Myös säätösauvat kuvataan nippujen välissä olevien albedoreunaehto-avulla. (Kuopanportti, 2019).

Ratkaistu neutronivuojakauma normalisoidaan sydämen termiseen tehoon, jolloin saadaan noodikohtaiset tehotiheydet. Polttoaineen lämpötila lasketaan suoraan toisen asteen polynomisovitteena tehotiheyden avulla. Jäähdytteen lämpötila sekä tiheys lasketaan entalpi- n noususta, joka saadaan puolestaan polttoaineni-pun energiata-seesta. (Kaloinen;ym., 1981).

HEXBUELSI käyttää nykyisin MOD5-ryhmävakiopakettia, joka on tuotettu CASMO-4E:ä ja Serpent2:lla. Ohjelmat ratkaisevat yksittäisen polttoainenipun yksityiskohtaisesti ja mallilla energiaryhmällä. Tulokset homogenisoidaan koko nipulle päteviksi 2-ryhmävakioksi reaktorin nimellistilassa eri palamilla. Lisäksi takaisinkytkentöjen vaikutus ryhmävakioihin saadaan muuttamalla tilaparametreja. Niitä ovat MOD5:ssä polttoaineen lämpötila, booritiheys ja jäähdytteen lämpötilan ja/tai tiheyden vaikutus. (Kuopanportti, 2017a). Ryhmävakioiden muutokset eri palamatiloissa sovitetaan 2. asteen polynomisovitteisiin. Yleinen muoto MOD5:n mallista näkyy kaavassa 2.6.

$$\Delta\Sigma = c_1\Delta\rho_J + c_2\Delta\rho_J^2 + c_3\Delta\sqrt{T_P} + c_4(\Delta\sqrt{T_P})^2 + c_5\Delta\rho_B + c_6\Delta\rho_B^2 + c_7\rho_B\Delta\rho_J, \quad (2.6)$$

jossa alaindeksi J tarkoittaa jäähdytettä, P polttoainetta ja B booria. Kuusi ensimmäistä termiä ovat jäähdytteen tiheyden, polttoaineen lämpötilan ja booritiheyden polynomisovitteita. Booripitoisuus vaikuttaa jäähdytteen tiheyden reaktiivisuusvaikutukseen, joten se on huomioitu viimeisellä termillä. Sitä ei kuitenkaan sovelleta diffuusiokertoimille. Eri palamatilojen sovitteiden välillä käytetään lineaarista interpolointia. (Peltonen, 1996 s. 3).

Ksenonin epähomogeeninen ja dynaaminen kuvaus otettiin käyttöön jälkikäteen alkuperäisenä tarkoituksena mallintaa mahdolliset ksenonoskillaatiot. HEXBU-3D suunniteltiin käytettäväksi myös VVER-1000-reaktorille, jonka sydämessä voi tapahtua oskillaatiota suuren koon vuoksi. (Kaloine;ym., 1986 s. 1). Ksenonin tarkka kuvaus on kuitenkin hyvin oleellinen ominaisuus, sillä epähomogeeninen myrkyttyminen voi johtaa termisten marginaalien ylittymiseen, vaikka oskillaatiota ei esiintyisi.

Ksenonin pitoisuuden vaikutus makroskooppiseen termiseen vaikutusalaan noodissa lasketaan yhtälöllä 2.7.

$$\Delta\Sigma_{Xe}(t) = \lambda_{Xe}^{-1}[\phi_{Xe}^0 + \frac{\partial\phi_{Xe}}{\partial\rho_J}(\rho_J - \rho_J^0)]C_{Xe}(t), \quad (2.7)$$

jossa ϕ_{Xe} ksenonvuo, λ_{Xe} ksenonin hajoamisvakio ja $C_{Xe}(t)$ ajasta riippuva pitoisuus. Yläindeksi 0 tarkoittaa nimellistilaa. HEXBU-3D:n laskenta toimii mikroskooppisen vaikutusalan sijaan ksenonvuolla, joten mikroskooppinen vaikutusala σ_{Xe} lasketaan jälkepäin kuten

kaavasta on havaittavissa. Lisäksi kaavassa on huomioitu jäädytteen tiheyden vaikutus ksenonvuohon sulkujen toisella termillä, sillä tiheys vaikuttaa neutronien hidastumiseen. (Kaloinen;ym., 1986 s. 4).

Jodin ja ksenonin pitoisuudet noodeissa noudattavat alaluvussa 2.2 kuvattua ksenoniin liittyvää hajoamisketjua. Sen pohjalta on muodostettu differentiaaliyhtälöt, jotka näkyvät kaavoissa 2.8 ja 2.9.

$$\frac{\partial C_1(t)}{\partial t} = \gamma_1[\Sigma_{\text{fis1}}\phi_1(t) + \Sigma_{\text{fis2}}\phi_2(t)] - \lambda_1 C_1(t) \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{\text{Xe}}(t)}{\partial t} = & \gamma_{\text{Xe}}[\Sigma_{\text{fis1}}\phi_1(t) + \Sigma_{\text{fis2}}\phi_2(t)] + \lambda_1 C_1(t) - \lambda_{\text{Xe}} C_{\text{Xe}}(t) - \\ & \sigma_{\text{Xe}} C_{\text{Xe}}(t)\phi_2(t) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Jodia ja ksenonia syntyy suoraan nopeista ja termisistä fissioista efektiivisillä osuuksilla γ_{Xe} ja γ_1 . Jodia häviää radioaktiivisen hajoamisen seurauksena vakiolla λ_1 , mutta ksenonia puolestaan oletetaan syntyvän saman verran. Ksenonia häviää radioaktiivisena hajoamisena vakiolla λ_{Xe} ja kaappausreaktioina termisessä neutronivuossa. (Kaloinen;ym., 1986 s. 2). Edellä kuvatut malliparametrit lasketaan CASMO-4E:llä (Fortum Power and Heat Oy, 2020e s. 4).

Jodin ja ksenonin yhtälöt on ratkaistu analyyttisesti, joten ne ovat laskuajallisesti tehokkaita ja tarkkoja myös pitkällä aika-askeleella. Ratkaistut yhtälöt näkyvät kaavoissa 2.10 ja 2.11.

$$C_1(t + \Delta t) = C_1^0(t) + [C_1(t) - C_1^0(t)]e^{-\lambda_1 \Delta t} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} C_{\text{Xe}}(t + \Delta t) = & C_{\text{Xe}}^0(t) + A e^{-\lambda_1 \Delta t} + [C_{\text{Xe}}(t) - C_{\text{Xe}}^0(t) - \\ & A]e^{-\Delta t(\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_{\text{Xe}}\tilde{\phi}_2(t))}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\text{jossa } A = \frac{\lambda_1}{\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_{\text{Xe}}\tilde{\phi}_2(t) - \lambda_1} [C_1(t) - C_1^0(t)], \quad C_1^0(t) = \frac{\gamma_1}{\lambda_1} [\Sigma_{\text{fis1}}\phi_1(t) + \Sigma_{\text{fis2}}\tilde{\phi}_2(t)]$$

$$\text{ja } C_{\text{Xe}}^0(t) = \frac{\gamma_1 + \gamma_{\text{Xe}}}{\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_{\text{Xe}}\tilde{\phi}_2(t)} [\Sigma_{\text{fis1}}\phi_1(t) + \Sigma_{\text{fis2}}\tilde{\phi}_2(t)].$$

Neutronivuot oletetaan vakioiksi aika-askeleen ajalle. Nopea neutronivuo ϕ_1 saadaan suoraan diffuusioyhtälöiden ratkaisusta, mutta ratkaistua termistä neutronivuota $\tilde{\phi}_2$ painotetaan edellisten aika-askeleiden arvoilla. (Kaloinen;ym., 1986 ss. 2-4).

Samariumin pitoisuuden vaikutus huomioidaan termisessä vaikutusalassa ainoastaan tasapainolaskuna kaavan 2.12 mukaisesti. Samariumin kertyminen tuoreessa polttoaineessa voidaan kuitenkin laskea ajan funktiona approksimointiin perustuvalla menettelyllä.

$$\Delta\Sigma_{Sm} = \frac{\lambda_{pm}}{\phi_{sm}} C_{Sm}, \quad (2.12)$$

jossa C_{Sm} on samariumin pitoisuus ja kertolaskun ensimmäinen termi samariumin mikrokooppinen vaikutusala prometiumin hajoamisvakion λ_{pm} ja samariumvuon ϕ_{sm} avulla ilmaistuna. Yhtälö sieventyy kaavan 2.13 muotoon, kun siihen sijoitetaan tasapainon samarium sekä nopean ja termisen neutronivuon suhde termisen energiaryhmän diffuusioyhtälöstä ratkaistuna.

$$\Delta\Sigma_{Sm} = \gamma_{Sm} \left[\Sigma_{fis2} + \frac{\Sigma_{abs2}}{\Sigma_{1 \rightarrow 2}} \Sigma_{fis1} \right], \quad (2.13)$$

jossa γ_{Sm} on samariumin osuus fissiotuotteista. (Kaloinen, 1992 ss. 8-10).

HEXBU-3D ratkaisee koko sydämen homogeenisen neutronivuo jakauman. HEXBU-ELSI-ohjelmistoon integroidulla ELSI-1440:llä kuitenkin vielä tarkennetaan ratkaisua siten, että tuloksena saadaan polttoaineniippukohtaiset heterogeeniset neutronivuo jakaumat. Toisin sanoen, tuloksena saadaan yksittäisten polttoainesauvojen termiset tehot, joiden avulla voidaan laskea myös yksittäisten alikanavien entalpian nousu ja lähtölämpötila. Alikanavien välinen jäähtytteen sekoittuminen on huomioitu CFD-tuloksiin pohjautuvalla sekoittumismallilla. ELSI-1440:llä ei ole kytkentää takaisin HEXBU-3D:hen, vaan se toimii vain tuloksien jälkikäsittelijänä. (Kuusisto, 1997).

ELSI-1440 toimii pohjimmiltaan samalla periaatteella kuin HEXBU-3D, eli kaavoissa 2.4 ja 2.5 näkyvät diffuusioyhtälöt ratkaistaan. Ratkaisu tehdään kuitenkin differenssimenetelmällä, jossa neutronivirran gradientit saadaan suoraan laskentatilavuuksien keskimääräisistä neutronivuon arvoista. Laskentahila on kaksiulotteinen, mutta hyvin yksityiskohtainen. Se kuvaa polttoainesauvat, alikanavat ja keskusputken omina laskentatilavuuksinaan. Lisäksi

viereisistä polttoainenipuista kuvataan kolmasosat. Nopean neutronivuon reunaehtona toimii vakioarvot, jotka saadaan HEXBU-3D:n tuloksena saaduista keskimääräisistä arvoista laskenta-alueessa (nippu + 6 naapurinippua). Keskimääräiset nopeat neutronivuot interpoloidaan laskentahilan reunoille sille kehitellyllä menetelmällä. Termisen neutronivuon reunaehdot ovat ekstrapolaatiopituuden avulla määritettyjä. (Kuusisto, 1997).

2.4.2 RESU-98

Termisten marginaalien valvominen toteutetaan suoritusarvolaskennan ohjelmiston RESU-98:n avulla. Marginaalien mahdollisimman tarkka mallintaminen mahdollistaa reaktorin käyttämisen lähempänä lineaaritehon ja alikanavan lähtölämpötilan turvallisuusrajoja. Siispä esimerkiksi sydämen tehonkorotus oli mahdollista toteuttaa. (Fortum Power and Heat Oy, 1999 s. 3). RESU-98:sta on jatkuvasti PTK-palvelimella laskentaa suorittava "Online"-versio sekä itsenäinen "Offline"-versio, jolla voidaan suorittaa laskentaa käyttäjän toimesta ns. RML-mittausnauhoilla. Uuden reaktiivisuustransienttien hallintatyökalun toteutukseen käytetään Offline-versiota, koska se helpottaa toteutusta ja ylläpitoa huomattavasti Online-versioon verrattuna.

RESU-98 käyttää HEXBU-ELSI:ä reaktorisydämen nykytilan simuloimiseen teoreettisesti. Esimerkiksi neutronivuo-, teho-, ksenon- sekä samariumjakaumat lasketaan sen avulla. Laskettuja neutronivuo- ja tehojakaumia voidaan edelleen tarkentaa hyödyntäen VVER-440-reaktoreiden runsasta sydäninstrumentaatiota: RESU-98 käyttää neutronivuon (YQ20X) ja nipun lähtölämpötilan (YQ30T) mittauksia jakaumien sovittamiseen lähemmäksi todellisia jakaumia. (Fortum Power and Heat Oy, 1999 s. 4).

Neutronivuo- ja tehojakauman sovittaminen on kolmivaiheinen menetelmä. Ensimmäiseksi teoreettisesti laskettu noodikohtainen nopea neutronivuojakauma sovitetaan neutronivuon mittauksiin. Toisessa vaiheessa sovitetulla nopealla neutronivuojakaumalla ja nopeaan vuo- hon referoiduilla teho vaikutusaloilla lasketaan noodikohtainen tehotiheysjakauma. Tehovai- kutusala kuvaa energian vapautumista fissioreaktiota kohden. Kolmannessa vaiheessa noo- dikohtainen tehotiheysjakauma tulkitaan nipputehoiksi eli kaksiulotteiseksi ja sovitetaan polttoainenippujen lämpötilamittauksista johdettuihin tehoihin. Lopuksi saadut jakaumat normalisoidaan reaktorin kokonaistehoon. (Fortum Power and Heat Oy, 2015e).

Neutronivuojakaumat sovitetaan ensin radiaalisessa suunnassa jokaiselle neljälle neutronivuointuritasolle. Kokonainen kolmiulotteinen jakauma saadaan interpoloimalla sovitetut jakaumat kaikille kymmenelle nooditasolle teoreettisen neutronivuojakauman muodon avulla. Anturitason radiaalinen sovitus toteutetaan minimoimalla kaavassa 2.14 näkyvää neliösummaa etsimällä kantafunktioiden $f_n(x_m, y_m)$ kertoimet c_n^k .

$$\tilde{F}(c_n^k) = \sum_{m=1}^{I_{tm}} \frac{1}{\delta_{k,m}^2} \cdot \left[\frac{\phi_m^{k,M}}{\phi_m^{k,T}} - \sum_{n=1}^N c_n^k f_n(x_m, y_m) \right]^2, k = 1 \dots 4 \quad (2.14)$$

Pienimmän neliösumman tarkoitus on löytää koko sydämelle pätevä korjausfunktio, joka on mahdollisimman lähellä mitatun ja teoreettisen neutronivuojakauman suhdetta. Kaavassa $\phi_m^{k,M}$ on anturitasolta k ja peitsen paikasta m mitattu neutronivuon arvo ja $\phi_m^{k,T}$ on vastaava, mutta teoreettisesti laskettu. $\delta_{k,m}^2$ on mitatun neutronivuon varianssi. Minimointiin otetaan mukaan vain toimivat mittaukset, joten I_{tm} on niiden lukumäärä. Kantafunktiot ovat ennalta määritettyjä funktioita, jotka vastaavat muodoltaan Helzholmin yhtälöön sovelletun difuusioyhtälön ominaisratkaisuja. Niitä voidaan tarvittaessa summata yhteensä 15 kappaletta tarkimman korjausfunktion muodon löytämiseksi. Minimoinnin jälkeen laskettu anturitason teoreettinen neutronivuojakauma kerrotaan löydetyllä korjausfunktiolla, jolloin tuloksena saadaan mittauksiin sovitettu jakauma. (Fortum Power and Heat Oy, 2015e).

Sovitetusta neutronivuojakaumasta laskettu polttoaineriippukohmainen tehojakauma sovitetaan lämpötilamittauksista johdettuun tehojakaumaan. Lähtölämpötilan mittauksella varustetun nipun termien teho voidaan laskea energiataseesta, koska jäähdytteen massavirtaus ja lämpötilannousu nipussa tiedetään. Sovitusmenetelmä on hyvin samankaltainen minimointitehtävä kuin neutronivuojakauma sovitus, mutta se tehdään kahdessa vaiheessa. Niitä ovat makroskooppinen tehokorjaus sekä symmetriakorjaus. Lopullinen tehojakauma saadaan sitten kertomalla sovitetusta neutronivuojakaumasta johdettu tehojakauma korjausfunktioiden summalla. (Fortum Power and Heat Oy, 2015c).

RESU-98 käyttää HEXBU-ELSI:ä polttoaineriipun sisäisten radiaalisten muotokertoimien määrittämiseen, joita voidaan puolestaan käyttää termisten marginaalien laskemiseen. Muun muassa lähimpänä palamariippuvaa rajaa olevan polttoainesauvan lineaariteho tallennetaan suhteessa nipun keskimääräiseen lineaaritehoon. Toinen tärkeä muotokerroin on alikanavan entalpian nousu. Toistaiseksi RESU-98 Online laskee yhden nipun muotokertoimet vain

kerran tunnissa, kun taas Offline-versio laskee kaikkien nippujen muotokertoimet joka laskentakerralla. (Fortum Power and Heat Oy, 2015b s. 2).

RESU-98:n laskennan alkuarvot ja tulokset tallennetaan tietokantaan. Lisäksi tietokannan avulla toteutetaan ohjelman sisäinen tiedonsiirto. Se sisältää kiinteää, latauskohtaista ja jakson aikana muuttuvaa tietoa. Kiinteät tiedot koostuvat lähinnä reaktorin geometriatiedoista. Latauskohtaiset tiedot kertovat esimerkiksi eri polttoainennippujen sijainnit reaktorisydämessä, joten ne on päivitettävä vaihtolatauksen yhteydessä. Mikäli polttoainennippu- tai anturityypit vaihtuvat latauksen yhteydessä, täytyy myös niiden malliparametrit päivittää. Näitä ovat esimerkiksi 2-ryhmävakiot, SPND-tulkintamallin herkkyydet sekä termohydrauliikan kuvaavien mallien parametrit. Jakson kuluessa muuttuvia tietoja ovat mittausarvot, laskennalliset suureet sekä laskennan avulla ylläpidettävät suureet. Näitä suureita päivitetään laskennan yhteydessä, eli aikaisemmat arvot eivät pysy tallessa tietokannassa. Mittausarvot tallennetaan suoraan syötteenä annettavista mittauksista. Laskennalliset suureet ovat taas RESU-98:n tuloksia kuten nipun sisäiset muotokertoimet ja termiset marginaalit. Laskennan kautta ylläpidettäviä suureita ovat muun muassa palama ja ksenonpitoisuus. Näiden suureiden päivittämiseen käytetään edellisiä arvoja. Esimerkiksi palamiin lisätään aika-askleen aikana toteutunut palama. "RENO"-toiminnolla voidaan korjata laskennan kautta ylläpidettäviä suureita tuottamatta jääneen energian verran, mikäli katkoksia esiintyy laskennan aikana. (Fortum Power and Heat Oy, 2021 ss. 2-8).

Suoritusarvolaskenta käynnistyy normaalikäytössä aina kerran tunnissa. Näin ollen yhden tunnin aikana kerätyistä mittausarvoista luodaan termiseen tehoon painotettuja efektiivisiä keskiarvoja laskentaan syötettäväksi. Ne kuvaavat reaktorifysikaalisia vaikutuksia paremmin verrattuna tavallisiin keskiarvoihin. Samanaikaisesti luodaan myös viikon aikana kertyneistä mittausarvoista yhden keskiarvot, jotka tulostetaan RML-mittausnauhoina RESU-98 Offline-versiolle. (Fortum Power and Heat Oy, 2015d). Nauhat ovat syöttötiedostoja, joille on koottu kaikki tarvittavat mittausarvot suoritusarvolaskennan toistamiseen. Yksi nauha ja tietokanta syötetään Offline-versioon ja tuloksena saadaan yhden nauhan mittausarvoilla päivitetty tietokanta. Toisaalta viikon mittausnauhojen käyttäminen ei anna kovin yksityiskohtaisia tuloksia. Esimerkki RML-nauhasta ja syötteiden tunnuksien kuvaukset näkyvät liitteessä II. Nauhojen mittausarvojen perässä oleva luku 0 tarkoittaa, että mittaus on kelpoisen laskentaan, kun taas luku 1 tarkoittaa epäkelvosta mittauksesta (esim. rikkoutunut anturi).

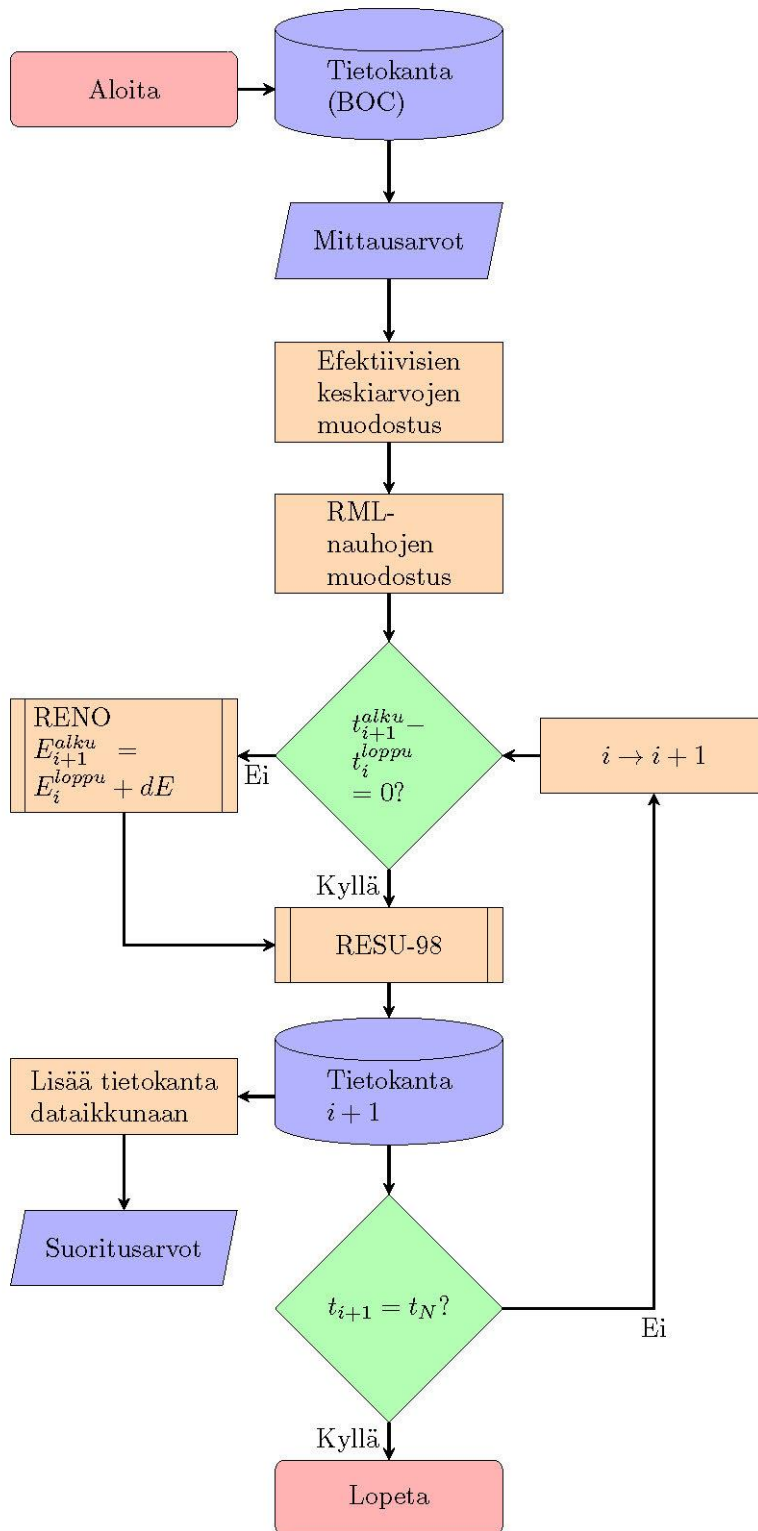
3 MENETELMIEN TOIMINTALOGIIKKA

Uusi reaktiivisuustransienttien hallintaa avustava työkalu ReactranHelp voidaan jakaa kolmeen funktioon alaluvussa 1.2 määritellyn tavoitteen perusteella: analyysi-, ennuste- sekä booraus- ja laimennusfunktioiksi. Analyysifunktiolla voidaan toistaa suoritusarvolaskenta mittausarvojen perusteella. Saatuja tuloksia voidaan käyttää esimerkiksi eri analyysitarkoituksiin. Se toimii myös pohjana ennustusfunktioille, jolla voidaan ennustaa reaktiivisuuden säätö, termisten marginaalien muuttuminen sekä sydämen lisästabilointi tarvittaessa. Ennustusfunktio käyttää hyödyksi myös booraus- ja laimennusfunktioita, joka käännetään Python3-ohjelmointikielelle nykyisin käytetyn Excel-työkalun pohjalta. Funktiolla voidaan kuvata booripitoisuuden dynamiikkaa eri boorinsäätöjärjestelmän osissa ja primääripiirissä. Lisäksi sillä voidaan arvioida tarvittava boorihapon ja laimennusvesiliuoksen määrä.

3.1 Reaktiivisuustransienttien analyysifunktio

RESU-98:n Offline-versiolla ja PTK:lle kerätyillä mittausarvoilla voidaan toistaa samat suoritusarvolaskennat kuin Loviisan ydinvoimalaitoksella tapahtuvassa online-laskennassa. Siispä laskettuja suureita, kuten muun muassa kuumimman alikanavan lähtölämpötila tai lineaaritehovara voidaan laskea jälkikäteen mittausarvoista. Tämän funktion toteutus on perusta ennustusfunktioille, koska sen suorittama suoritusarvolaskenta tapahtuu analyysifunktion kautta.

Analyysifunktion toimintalogiikka vuokaaviona näkyy kuvassa 3.1. Ensimmäisenä valitaan jakson alun tietokanta, joka toimii ikään kuin alkuarvoina analyysifunktioille. Jakson alun tietokannassa reaktori ei ole siis ehtinyt vielä tuottamaan yhtään energiaa polttoainelatauksen jälkeen. Tietokantaa päivitetään seuraavaksi mittausarvoilla, jotka kattavat jakson alusta haluttuun loppuhetkeen saakka. Tiheämmästä mittausdatasta voidaan halutessaan tuottaa efektiivisiä keskiarvoja. Jos suoritusarvoja halutaan vain tietyistä aikajaksosta keskellä käyttöjaksoa, alku voidaan päivittää ensin esimerkiksi viikon pituisilla efektiivisillä keskiarvoilla. RESU-98 käyttää tietokannan päivittämiseen aina saman verran aikaa, joten efektiivisillä keskiarvoilla säästetään laskuaikaa merkittävästi tarkkuutta huonontamatta. Kiinnostava tilanne kuten reaktiivisuustransientti päivitetään tietokantaan puolestaan suoraan mittauksilla tai tiheämmillä keskiarvoilla. Näin ollen siitä myös vastaavasti saadaan tiheämpää dataa.



Kuva 3.1 Analyysifunktion toimintalogiikka vuokaaviona.

Mittausdata käännetään käsittelyn jälkeen RML-nauhoiksi, eli RESU-98 Offline-versiolle ymmärrettävään muotoon. RESU-98:lla päivitetään syötteenä annettua jakson alun tietokantaa yksi nauha kerrallaan viimeiseen nauhaan saakka. Tietokanta käännetään aina päivityksien välissä taulukkomaiseen muotoon eli dataikkunaksi. Lopputulokseksi saadaan yksi koottu dataikkuna, joka sisältää kaikkien ajanhetkien tulokset. Dataikkunaa voidaan käyttää esimerkiksi muissa Python3-pohjaisissa funktioissa sellaisenaan, tai sillä voidaan piirtää sydänkarttakuvaajia tai käyriä.

Mittausarvoja pyritään syöttämään siten, että jokainen ajanhetki tulisi katetuksi. Jos edellisen nauhan jälkeinen aika ei vastaa seuraavan nauhan alun aikaa, energiaa jää tuottamatta. Näin ollen tietokannan energiaa täytyy korjata tuottamatta jääneen energian verran RENO-toiminnolla. Tuotettu energia vie laskentaa eteenpäin, joten tuottamatta jäänyt energia näkyy virheenä muun muassa polttoaineniippujen palamissa ja ksenonpitoisuuksissa. Erityisesti virhettä voi tulla reaktiivisuustransientin laskennassa, jossa ksenonpitoisuus voi vaihtua nopeasti. RML-nauhojen ajat eivät aina täsmää, jos yhdistetään erilaisia syötteitä kuten automaattisesti tulostuneita viikkonauhoja ja jälkikäteen haettuja mittausarvoja.

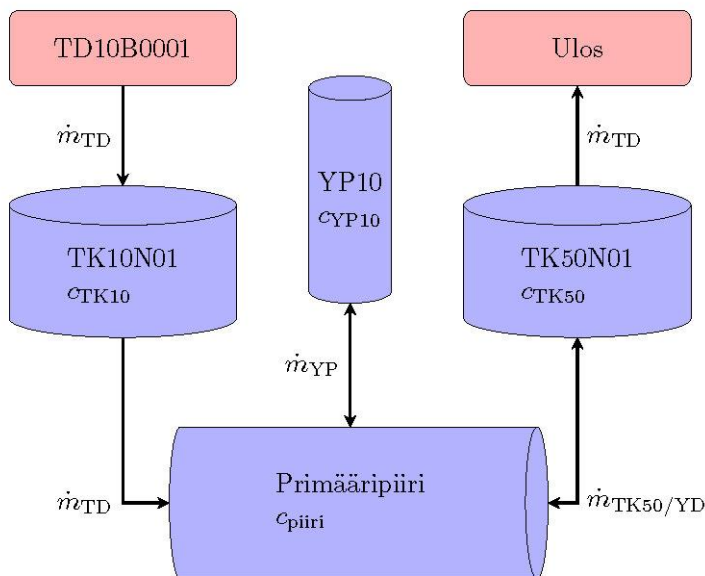
3.2 Booraus- ja laimennusfunktio

Excel-pohjaista booraus- ja laimennustyökalua on käytetty Loviisan ydinvoimalaitoksella boorihappo- ja laimennusvesitarpeen määrittämiseen. Lisäksi työkalulla voidaan kuvata booripitoisuuden aikakäyttäytymistä primääripiirissä sekä eri osissa booripitoisuuden hallintajärjestelmää. Sitä käytetään ReactranHelp:n ennustusfunktion toteutuksessa, kun booripitoisuudelle määritellään suurin gradientti. Työkalussa on havaittu olevan tarkkuusongelmia, koska se ei huomioi boorihapon sekoittumista eri hallintajärjestelmän osissa. Tässä diplomityössä ei kuitenkaan keskitytä sen ratkaisemiseen.

Booraus- ja laimennustyökalusta ei ole kattavaa dokumentointia, joten sen toimintalogiikka ja käyttöarvot on tulkittu suoraan Excel-soluista ja -merkinnöistä. Ne ovat samat kummankin laitoksen osalta. Työkalussa booripitoisuuden hallintajärjestelmää on huomattavasti yksinkertaistettu. Järjestelmän olennaiset osat oletetaan pistemäisiksi säiliöiksi, joiden boorihappopitoisuus lasketaan differentiaaliyhtälöiden avulla. Kytkennässä myös oletetaan, että järjestelmä on koko ajan tasapainossa massan suhteen. Näin ollen säiliöiden

boorivesiliuosmassat eivät muutu ja järjestelmästä on poistuttava saman verran massaa, kuin sinne syötetään.

Kuvassa 3.2 näkyy säiliöt sekä niiden kytkentä. Järjestelmään kuuluu primääripiiri, paineistin YP10 sekä kaasunpoistimet TK10/50(N0001). Kytken lähde on laimennusvesiliuoksen säiliö TD10(B0001), josta käyttäjän valitsema massavirtaus liuosta virtaa yksisuuntaisesti TK10-kaasunpoistimeen. Sama määrä liuosta vastaavasti poistuu kaasunpoistimesta primääripiiriin. Paineistin oletetaan olevan kaksisuuntaisessa yhteydessä primääripiiriin eli boorivesiliuosta virtaa 1,7 kg/s primääripiiristä paineistimeen ja takaisin. Primääripiiri on normaalisti kytketty yksisuuntaisesti TK50-kaasunpoistimeen, lukuun ottamatta sekoitusvaihetta, jolloin kytkentä on kaksisuuntainen. Osa TK50-kaasunpoistimeen menevästä massavirtauksesta (1 kg/s) on kiertovesipumppujen tiivistevettä ja erotus suoraan TK50-kaasunpoistimeen saapuvaa boorivesiliuosta. Lopuksi boorivesiliuos poistuu kytkennän ulkopuolelle TK50-kaasunpoistimesta.



Kuva 3.2. Laimennusjärjestelmän kytkentä booraus- ja laimennusfunktiossa.

Sekoitusvaihe suoritetaan yleensä heti laimentamisen tai boorauksen jälkeen. Sen tarkoitus on tasoittaa primääripiirin ja TK50-kaasunpoistimen väliset boorihappopitoisuudet. Silloin kytkentä muuttuu suljetuksi, jolloin laimennusvesiliuosta ei syötetä TK10-kaasunpoistimeen. Vastaavasti TK50-kaasunpoistimesta ei poistua boorivesiliuosta kytkennän ulkopuolelle. TK50-kaasunpoistimeen menevä ja takaisin primääripiiriin palaava massavirtaus

asetetaan arvoon 7 kg/s. Näin ollen kiertovesipumppujen tiivistevedet huomioiden massavirtaus primääripiiriin ja TK50-kaasunpoistimen välillä on yhteensä 8 kg/s.

Differentiaaliyhtälöt on muodostettu absoluuttisen boorihapon suhteen. Sen muutosnopeus on yhtä suuri kuin sisään- ja ulosvirtauksien summa. Pitoisuutena käytetään boorihappopitoisuutta, joten yksikkö on g/kg. Se voidaan muuttaa jälkeempään booripitoisuudeksi kertomalla 175 ppm g kg⁻¹ avulla. Yhtälöryhmä näkyy kaavassa 3.1.

$$\begin{cases} \frac{dC_{TK10}}{dt} M_{TK10} = \dot{m}_{TD} C_{TD} - \dot{m}_{TD} C_{TK10} \\ \frac{dC_{piiri}}{dt} M_{piiri} = \dot{m}_{TD} C_{TK10} + \dot{m}_{YP} C_{YP10} - (\dot{m}_{TK50/YD} + \dot{m}_{YP}) C_{piiri} + S \\ \frac{dC_{YP10}}{dt} M_{YP10} = \dot{m}_{YP} C_{piiri} - \dot{m}_{YP} C_{YP10} \\ \frac{dC_{TK50}}{dt} M_{TK50} = \dot{m}_{TK50/YD} C_{piiri} - \dot{m}_{TK50/YD} C_{TK50} \end{cases} \quad (3.1)$$

jossa M järjestelmän säiliön boorivesiliuosmassa [kg],
 \dot{m} boorivesiliuoksen massavirtaus [kg/s],
 C boorihappopitoisuus [g/kg].

Suureiden alaindeksit noudattavat kuvan 3.2 mukaisia merkintöjä. Esimerkiksi TK10-kaasunpoistimeen syötetään boorivesiliuosta TD10-säiliöstä massavirtauksella \dot{m}_{TD} ja pitoisuudella C_{TD} . Yhtälöryhmän termi S kuvaa sekoitusvaiheen kytkentää ja sen määrittely näkyy kaavassa 3.2. Massavirtaus \dot{m}_{TK50} noudattaa kaavan 3.3 määrittelyä.

$$S = \begin{cases} (\dot{m}_{TK50} + \dot{m}_{YD}) C_{TK50}, & \dot{m}_{TD} = 0 \\ 0, & \dot{m}_{TD} > 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\dot{m}_{TK50} = \begin{cases} 7 \text{ kg/s}, & \dot{m}_{TD} = 0 \\ 0 \text{ kg/s}, & \dot{m}_{TD} \leq \dot{m}_{YD}, \dot{m}_{TD} \neq 0 \\ \dot{m}_{TD} - \dot{m}_{YD}, & \dot{m}_{TD} > \dot{m}_{YD}, \dot{m}_{TD} \neq 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Kaavojen mukaan kytkentä muutetaan sekoitusvaiheen kytkennäksi, kun boorivesiliuoksen massavirtaus TD10-säiliöstä on arvoltaan 0 kg/s. Mikäli massavirtaus on erisuuri kuin 0 kg/s mutta pienempi kuin tiivistevesien massavirtaus, TK50-kaasunpoistimeen suoraan menevän massavirtauksen arvoksi oletetaan 0 kg/s. Näin ollen se ei voi saada negatiivista arvoa, joka

tarkoittaisi väärän suuntaista virtausta. Muissa tilanteissa se on kytkentään syötetyn laimennusvesiliuoksen massavirtauksen ja tiivistevesien erotus.

Yhtälöryhmän 3.1 boorivesiliuosmassat näkyvät taulukossa 3.1. Ryhmän alkuarvot riippuvat siitä, käytetäänkö sitä laimennuksen vai boorauksen arviointiin. Laimentaessa primääripiirin ja TK10-säiliöiden pitoisuudet asetetaan mittauksia vastaavaksi. Muilla säiliöillä oletetaan olevan lähtötilanteessa samat pitoisuudet kuin primääripiirillä. TD10-säiliöstä tulevan laimennusvesiliuoksen pitoisuus saadaan taas TTKE:n rajoituksesta, joka esiteltiin kuvassa 2.4. Laimentaminen on rajoituksen arvolla mahdollisimman tehokasta. Massavirtauksen suuruus TD10-säiliöstä voi olla 0 - 18 kg/s väliltä. Se vastaa yhtä suurkapasiteettista TK10-pumppua, jota voidaan säätää potentiometrillä. Tarvittaessa kaikkia arvoja voidaan muuttaa käyttäjän toimesta.

Taulukko 3.1. Booraus- ja laimennusfunktiossa käytettävät boorivesiliuosmassat.

Säiliö	Symboli	Massa [kg]
Kaasunpoistin TK10	M_{TK10}	18 000
Kaasunpoistin TK50	M_{TK50}	18 000
Primääripiiri	M_{piiri}	163 000
Paineistin YP10	M_{YP10}	11 000

Kun funktiota käytetään boorauksen arviointiin, TD10-säiliöstä tulevan boorivesiliuoksen pitoisuus oletetaan vahvan boorihapon pitoisuudeksi eli 40 g/kg. Myös TK10-kaasunpoistimen pitoisuus asetetaan samaan arvoon. Tällä oletuksella TD10-säiliö ja TK10-kaasunpoistin oletetaan yhdeksi vahvan boorihapon säiliöksi. Primääripiirin pitoisuus katsotaan lähtötilanteessa taas mittauksia vastaavaksi ja loppujen säiliöiden pitoisuudet asetetaan samaan arvoon. Vahva boorihappo pumpataan samanlaisella pumpulla kuin laimennusvesiliuoskin, joten sen massavirtaus on 0 - 18 kg/s väliltä.

Laimennusvesiliuoksen syötön määrää seurataan TD10-säiliön pintaa seuraamalla. Säiliöstä tuleva massavirtaus voidaan muuttaa pinnan korkeuden muutosnopeudeksi kertoimen 450 kg/cm avulla. Kun tiedetään pinnan alkukorkeus, niin voidaan arvioida tarvittavaa laimennusvesimäärää vastaava loppupinnankorkeus.

Yhtälöryhmä 3.1 ratkaistaan numeerisesti eksplisiittisellä differenssimenetelmällä. Menetelmässä edetään aika-askel kerrallaan käyttämällä aina edellisen ajankohdan arvoja. Excel-

työkalun aika-askeleen pituutena käytetään kahta minuuttia. Uuteen funktioon se valitaan herkkyyksianalyysin perusteella.

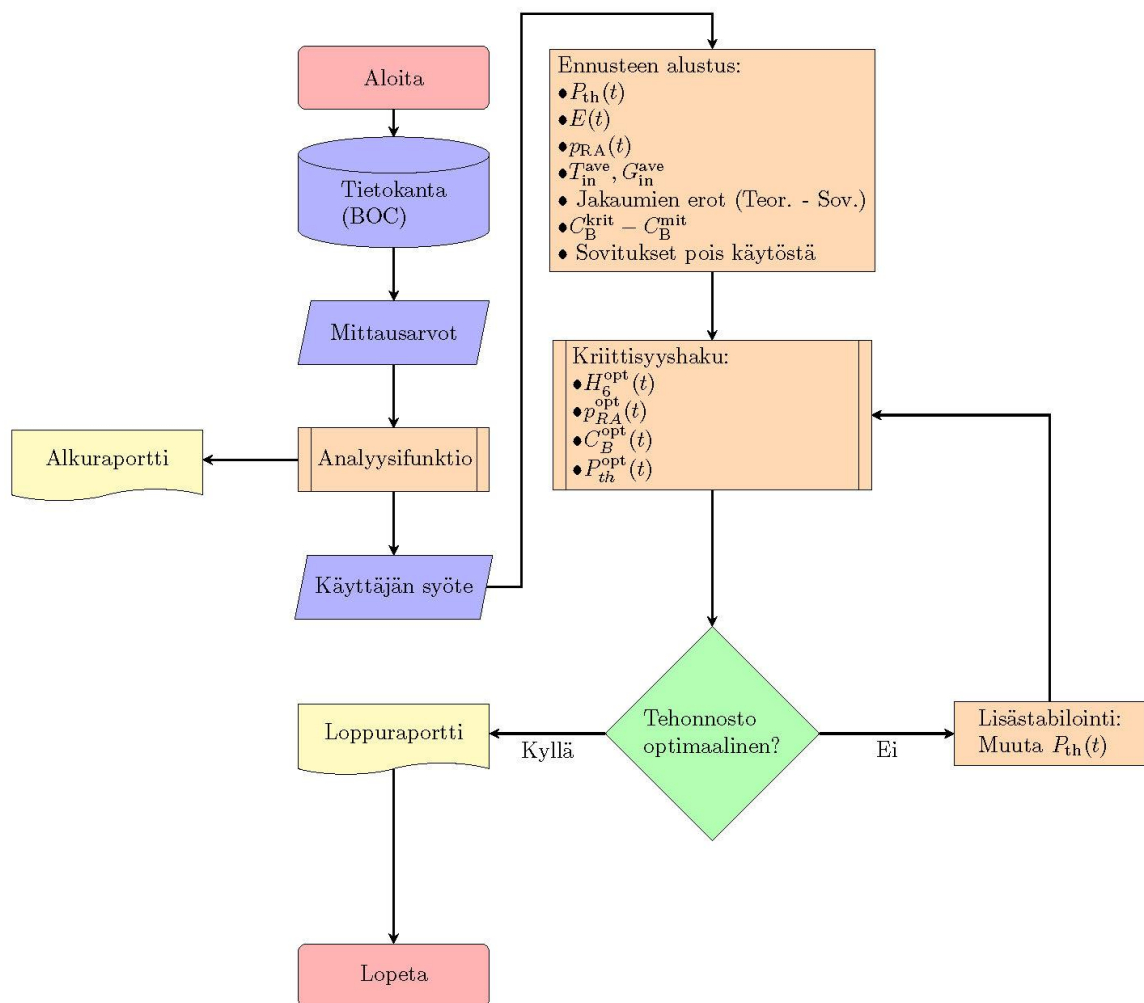
3.3 Reaktiivisuustransienttien ennustusfunktio

Tässä alaluvussa kuvataan ennustusfunktion toimintalogiikka. Ennusteiden luominen antaa käyttäjälle paremman kuvan tehonnoston aikaisesta ja jälkeisestä reaktiivisuustransientista. Toisin sanoen käyttäjälle ilmoitetaan, miten reaktiivisuutta tulisi säätää ja kuinka termiset marginaalit kehittyvät. Ennustusfunktiolla voidaan myös suunnitella turvallisempi tehonnosto, mikäli termisten marginaalien ennustetaan ylittyvän. Ennusteita voidaan luoda vaikka joka tunti transientin edessä. Näin ollen voidaan huomioida toteutunutta historiaa paremmin tulevaisuutta arvioidessa.

RESU-98 on tarkoitettu nykytilan laskemiseen. Mikään ei kuitenkaan estä sitä, että sillä voidaan myös laskea tulevaisuuteen. Teoreettisten tuloksien laskentaan tarvitaan vain seuraavat suureet: terminen teho (YC00Q801), tuotettu energia, säätösauvojen asennot (YS00S), jäähdytteen lämpötilat ja massavirtaukset kylmähaaroista (YAT805, YAF801) sekä paine sydämessä (YC10P001). Nämä arvot ovat helposti arvioitavissa tulevaisuuteen. Tehojakauman sovitukseen käytettävien lähtölämpötilamittauksien (YQ30T) ja neutronivuomittauksien (YQ20X) arvioiminen taas ei ole mahdollista, joten ne täytyy kytkeä pois päältä. Nykytilan ja historian sovitettuja jakaumia voidaan kuitenkin käyttää tulevaisuuden teoreettisten tulosten korjaamiseen. ReactranHelp:n osalta keskitytään kuumimman alikanavan lähtölämpötila-, lineaariteho- ja nipputehojakauman tarkkaan ennustamiseen. Edellä mainittujen marginaalien ennustaminen riittää, sillä esimerkiksi DNB-suhteen ja polttoaineen sulamisvaran riittävyys varmistetaan niiden kautta (Fortum Power and Heat Oy, 2020d ss. 3-4).

Kuvassa 3.3 näkyy ennustusfunktion toimintalogiikan vuokaavio. Ensimmäinen tavoite on päivittää lähtötilanne nykytilaa vastaavaksi. Ehtona ennusteen luomiselle on, että nykytilassa voidaan aloittaa reaktorin tehon nostaminen tai se on jo aloitettu. Lähtötilanteeseen päästään päivittämällä jakson alun tietokanta kerätyillä mittausarvoilla analyysifunktiota käyttäen. Vaiheesta tulostetaan käyttäjälle raportti, jonka avulla lähtötilannetta verrataan laitosella tapahtuvan suoritusarvolaskennan arvoihin. Näin ollen varmistetaan, että tilanteen laskennan toistaminen on tapahtunut oikein.

Seuraavaksi käyttäjä antaa ennusteen toteutukseen vaikuttavat parametrit. Ne vaikuttavat suoraan ennusteen alustukseen sekä kriittisyyden hakuun, joista kerrotaan tarkemmin alaluvuissa 3.3.1 ja 3.3.2. Kriittisyyden haussa tehonnosto voi muuttua suunnitellusta epäoptimaaliseksi, koska haku ei perustu dynaamiseen optimointiin. Jos tulos ei vastaa käyttäjän odotuksia, reaktorin tehonnostoa täytyy muuttaa alkuperäisestä ja vuokaaviolla on palattava takaisin kriittisyyden hakuvaiheen alkuun. Alkuperäisen tehonnoston muuttaminen toteutetaan sydämen lisästabiloinnin avulla ja siitä kerrotaan lisää alaluvussa 3.3.3. Lopullisesta ennusteesta tulostetaan käyttäjälle raportti.



Kuva 3.3. Ennustusfunktion vuokaavio.

3.3.1 Ennusteen alustus

Ennusteen alustuksessa luodaan pohja ennusteelle eli ikään kuin tarvittavat RML-nauhat valmiiksi. Teho- ja vuojakaumien sovitukseen käytettävät mittaukset kytketään nauhoista pois päältä. Pohjaan määritellään valmiiksi ajan suhteen muuttuva terminen teho ja tuotettu energia. Vakioksi oletettu primääripiirin paine saadaan nykyhetkestä. Säättävän ryhmän asennolle asetetaan käyttäjän valitsemat alkuarvot ajan funktiona, joista käytetään nimitystä tavoitearvot. Myös RA-paineelle asetetaan tavoitearvot, koska myöhemmin jäähdytteen tulo- ja lämpötilan ja massavirtauksen todetaan riippuvan siitä. Säättävän ryhmän asentoa ja RA-painetta kuitenkin muutetaan tarvittaessa tavoitearvoista reaktiivisuuden kompensoimiseksi. Mikäli reaktiivisuuden säätöä ei näillä toteuteta, ne jäävät tavoitearvoihinsa. Booripitoisuuden kanssa menetellään eri tavalla, sillä RESU-98 laskee tuloksena kriittisen booripitoisuuden.

Terminen teho voidaan arvioida pohjaan TTKE:n tehon nostonopeuksien rajoitusten avulla, jotka esiteltiin alaluvussa 2.1.1. Tehon nostonopeuksien rajoitukset riippuvat siitä, kuinka paljon tehon laskusta on aikaa. Se on siis parametri, joka täytyy ratkaista historian avulla. Teho voidaan nostaa myös askelina jatkuvan noston sijaan tietyissä tilanteissa, joten tavan valinta annetaan käyttäjälle määritettäväksi. TTKE:ssa määriteltyjen stabilointitehojen toleransseja ei huomioida oletusarvona, mutta käyttäjä voi halutessaan valita eri stabilointitehon toleranssien puitteissa.

Tehon nostonopeuksien rajoitukset on asetettu generaattoritehon suhteen. Näin ollen generaattoriteho täytyy muuttua termiseksi tehoksi laitoksen hyötysuhteen avulla (omakäyttöä ei vähennetty). Hyötysuhde on kuitenkin riippuvainen termisestä tehosta, koska se vaikuttaa sydämen entalpian nousuun. Alemmilla termisillä tehoilla lämpöenergia tuodaan kierto- ja lämmityksessä alemmassa lämpötilassa, joten hyötysuhde pienenee Carnot'n kierron mukaisesti. Todelliseen kiertoon vaikuttaa myös monet muut tekijät, joten hyötysuhteelle täytyy esimerkiksi luoda sovite kerättyjen mittausarvojen avulla. Tässä diplomityössä ei kuitenkaan keskitytä sovittien luomiseen, koska validoinnissa käytettävässä tapauksessa terminen teho nousee 92 %:sta nimelliseen tilaan. Näin ollen hyötysuhteen voidaan olettaa pysyvän noin 35 %:ssa.

Terminen teho voidaan laskea ajan suhteen kaavalla 3.4.

$$\frac{dP_{\text{th}}}{dt} = \frac{\theta_{\text{TTKE}}}{\eta(P_{\text{th}})}, \quad (3.4)$$

jossa θ_{TTKE} on TTKE:n mukainen tehon nostonopeuden rajoitus tilanteen mukaan. Kaava järjestellään uudelleen, integroidaan puolittain ja lopuksi siitä ratkaistaan aika-askeleen pituus. Lopputulos näkyy kaavassa 3.5.

$$\begin{aligned} \int_{P_{\text{th},i}}^{P_{\text{th},i+1}} \eta(P_{\text{th}}) dP_{\text{th}} &= \int_{t_i}^{t_{i+1}} \theta_{\text{TTKE}} dt \\ \Leftrightarrow H(P_{\text{th},i+1}) - H(P_{\text{th},i}) &= \theta_{\text{TTKE}} \cdot [t_{i+1} - t_i] \\ [t_{i+1} - t_i] = \Delta t &= \frac{H(P_{\text{th},i+1}) - H(P_{\text{th},i})}{\theta_{\text{TTKE}}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Aika-askel ratkaistaan termisen tehon $P_{\text{th},i+1}$ sijasta, sillä hyötysuhteen integraalin käänteisfunktio H^{-1} on vaikea ratkaista epälineariselle tai korkeamman asteen polynomisovitukselle. Sen sijaan, pelkkä hyötysuhteen funktion integroiminen määrättyllä välillä voidaan ratkaista jopa analyttisesti. Jos hyötysuhde oletetaan vakioksi termisen tehon suhteen, aika-askel voidaan laskea kaavalla 3.6.

$$\Delta t = \frac{\eta_{\text{vakio}} [P_{\text{th},i+1} - P_{\text{th},i}]}{\theta_{\text{TTKE}}} \quad (3.6)$$

Mikäli analyttinen ratkaisu ei onnistu, käytetään QUADPACK -integroimisrutiinia. Se koostuu joukosta kehittyneitä numeerisia integroimismenetelmiä. Integraali katsotaan ratkaistuksi käyttäjän asettaman tarkkuusvaatimuksen täytyessä. (Piessens;ym., 1983). ReactranHelp:ssä käytetään Python3 Scipy -kirjastoon implementoitua QUADPACK-rutiinia. Se saavuttaa vaaditun tarkkuuden, jos absoluuttinen tai suhteellinen integraalin virhe on alle $1,49 \cdot 10^{-8}$. Sitä voidaan kuitenkin tiukentaa käyttäjän toimesta. (The SciPy community, 2021).

Tehoaskeleeksi $P_{th,i+1} - P_{th,i}$ valitaan pieni luku, jotta teho ajan funktiona saadaan kuvattua mahdollisimman tarkasti. Arvioidut termiset tehot muutetaan vielä RESU-98:lle efektiiviseksi keskiarvoiksi, jotka voidaan laskea kaavalla 3.7.

$$\langle P_{th} \rangle = \frac{\int_t^{t+\Delta T} [P_{th}(t) \cdot P_{th}^*(t)] dt}{\int_t^{t+\Delta T} P_{th}^*(t) dt} \approx \frac{\sum_{i=0}^N [P_{th,i} \cdot P_{th,i}^* \cdot \Delta t_i]}{\sum_{i=0}^N [P_{th,i}^* \cdot \Delta t_i]}, \quad (3.7)$$

jossa indeksit $i = 0 \dots N$ vastaavat aikaväliä $[t, t + \Delta T]$. $P_{th,i}^*$ on suhteellinen teho nimelliseen arvoon nähden. ReactranHelp luo vakioasetuksena tunnin pituisia efektiivisiä keskiarvoja. Lisäksi samalle intervallille lasketaan tuotettu energia integroimalla arvioitua termistä tehoa kaavan 3.8 mukaisesti.

$$E_{\Delta T} = \int_t^{t+\Delta T} P_{th}(t) dt \approx \sum_{i=0}^N P_{th,i} \cdot \Delta t_i \quad (3.8)$$

Jäähdytteen tulolämpötila vaikuttaa keskimääräiseen sydämen lämpötilaan, joten sillä on suora vaikutus reaktiivisuuteen ja jäähdytteen lähtölämpötilaan. Näin ollen reaktiivisuuden säädön ja kuumimman alikanavan lähtölämpötilan ennustamisen näkökulmasta se on keskeinen parametri. Lisäksi se vaikuttaa kylmähaaroista tulevan jäähdytteen massavirtaukseen tiheyden mukaan.

Terminen teho on verrannollinen entalpian nousuun sydämen yli. Näin ollen se vaikuttaa tulolämpötilaan, koska suurempi kuorma vaatii isomman lämpötilaeron primääripiirin ja sekundääripiirin välille. Toisaalta RA-paine määrittää sekundääripiirin saturaatiolämpötilan, jota lähelle primääripiirin vesi jäähtyy. Saturaatiolämpötila saadaan paineen avulla taulukkoarvoista. Lämpötilaero primääri- ja sekundääripiirin välillä täytyy ratkaista reaktorin termisen tehon funktiona.

Nykyisessä Excel-pohjaisessa reaktiivisuuden hallintatyökalussa päädyttiin käyttämään mitausarvoihin sovitettua korrelaatiota tulolämpötilan ratkaisemiseksi kummallekin reaktoriyksikölle. Korrelaation alkuperästä, tarkkuudesta ja rajoitteista ei ole tietoa, joten sen ennustetarkkuutta arvioidaan luvussa 4.4.1 ennustusfunktion validoinnin yhteydessä. Korrelaatio näkyy kaavassa 3.9.

$$T_{in}^{ave}(P_{th}, p_{RA}) = T_s(p_{RA}) + 0,0004030572 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot P_{th}^*{}^2 + 0,04723646 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot P_{th}^* + 1,351808 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.9)$$

jossa $T_s(p_{RA})$ sekundääripiirin saturaatiolämpötila celsiusasteina RA-paineen funktiona (taulukkoarvo) ja P_{th}^* suhteellinen terminen teho nimellisarvoon nähden.

Korrelaatiolla ei voi ratkaista kylmähaarakohtaisia tulolämpötiloja, koska se toimii RA-paineen (höyrynkokoojan) funktiona. Sama lämpötila on asetettava jokaiselle kylmähaarakalle. Se asettaa ehdon, että kaikkien höyrystimien täytyy olla normaalisti käytössä.

Keskiarvoinen tulolämpötila ei kuitenkaan tällä hetkellä huononna suoritusarvolaskennan tarkkuutta, sillä tulolämpötilojen sovitusta ei ole vielä otettu käyttöön YQ10-mittauksien huonon tarkkuuden takia. Lisäksi kylmähaarojen lämpötiloihin ja CFD-analyysien tuloksiin perustuva tulolämpötilasovitusmalli ei ole antanut riittävän hyviä tuloksia. (Kuopanportti, 2016).

Tulolämpötilalla voidaan edelleen ratkaista jäähdytteen bruttomassavirtaus alun perin laaussuunnittelua varten kehitetyillä lineaarisilla korrelaatioilla. Bruttomassavirtaus muuttuu vain tiheyden mukaan, koska normaalisti kaikki kiertovesipumput pidetään käynnissä ja samalla kierrosnopeudella. Toisin sanoen soviteissa oletetaan tilavuusvirtauksen pysyvän vakiona. LO1:n ja LO2:n kokonaistilavuusvirtauksista käytetään vakioarvoja $9,91 \text{ m}^3/\text{s}$ ja $10,31 \text{ m}^3/\text{s}$, jolloin veden tiheyden lineaarisovite saadaan bruttomassavirtauksen korrelaatioiksi 3.10 ja 3.11 (yhdelle kylmähaarakalle).

$$\dot{m}_{YA}^{LO1} = -2,55 \frac{\text{kg/s}}{^\circ\text{C}} T_{in}^{ave} + 1972 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (3.10)$$

$$\dot{m}_{YA}^{LO2} = -2,65 \frac{\text{kg/s}}{^\circ\text{C}} T_{in}^{ave} + 2052 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (3.11)$$

Vakio-oletus tilavuusvirtauksille todettiin olevan riittävän tarkka vertaamalla korrelaatioiden tuloksia mittausarvoihin. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää mittausarvoihin sovitettua korrelaatiota LO1:n osalta, joka näkyy kaavassa 3.12. (Kuopanportti, 2017b ss. 11-13.)

$$\dot{m}_{YA,mit}^{LO1} = -2,58 \frac{\text{kg/s}}{^\circ\text{C}} T_{in}^{ave} + 2105 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (3.12)$$

Seuraavaksi ennusteen alustuksessa määritetään teoreettisten tulosten korjausmenetelmän vaatimat parametrit. Menetelmä perustuu oletukseen, että teoreettisten ja sovitettujen jakaumien erot eivät muutu merkittävästi transientin aikana. Erot voidaan siis laskea toteutuneista arvoista nykytilassa ja ennen nykytilaa. Useasta ajankohdasta lasketaan erojen keskiarvo, jolloin saadaan mittauksien vaihtelut huomioon paremmin.

Sydämen kuumimman alikanavan lähtölämpötilan korjaamiseksi ensin lasketaan kaikki nippukohtaiset kuumimman alikanavan lähtölämpötilat teoreettisina sekä sovitettuina. Sen jälkeen sovitetut arvot vähennetään teoreettisista arvoista kaavan 3.13 mukaisesti. Korjaus tapahtuu tämän jälkeen vähentämällä lasketut erot ennustetuista teoreettisista jakaumista kaavan 3.14 mukaisesti.

$$\langle \Delta T_{1...349}^{smax} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [T_{1...349}^{smax,T}(t_i) - T_{1...349}^{smax,S}(t_i)] \quad (3.13)$$

$$T_{1...349}^{smax,K}(t_E) = T_{1...349}^{smax,T}(t_E) - \langle \Delta T_{1...349}^{smax} \rangle, \quad (3.14)$$

joissa $T_{1...349}^{smax}$ nippujen kuumimman alikanavien lähtölämpötilojen vektori [$^\circ\text{C}$],
 t_i nykytilan/historian ajankohta [h],
 t_E ennusteen ajankohta [h].

Yläindeksit "T", "S" ja "K" viittaavat teoreettiseen, sovitettuun ja korjattuun jakaumaan. Korjauksen jälkeen kuumimman alikanavan lähtölämpötila saadaan etsimällä jakaumasta suurin arvo.

Nipputehojen korjaus toteutetaan käyttämällä samaa menetelmää, mutta lineaaritehovaran korjaus toteutetaan eri tavalla. Lineaariteho lasketaan polttoainenipun suurimmasta tehotiheydestä (tehokkain noodi) radiaalisella tehomuotokertoimella. Ainoastaan noodikohtaiset tehotiheydet korjataan, jolloin nipun sisäisistä tehomuotokertoimista käytetään teoreettisia arvoja. Lineaaritehoa vastaava sauvapalamariippuva turvallisuusraja on myös teoreettinen. Tätä menettelyä käytetään, koska RESU-98:n tietokantaan tallennetaan vain rajoitusta

lähimpänä olevan sauvan lineaariteho muotokertoimena. Siispä ei voida taata, että eroa las-
kiessa sauvat ovat täysin samat teoreettisesti sekä sovitettuna laskettuna. Korjattu rajoitta-
vien lineaaritehojen jakauma voidaan laskea kaavalla 3.15. Lineaaritehovarot saadaan laske-
malla suhteellinen ero teoreettisiin sauvapalamariippuviin lineaaritehorajoihin. Koko reakt-
torin lineaaritehovara on siis pienin jakaumasta löytyvä vara.

$$q_{1...349}^{\text{lim,K}}(t_E) = K_{1...349}^{q \text{ lim}} \psi_{1...349}^{q,T} \max_k [Q_{1...3490}^T(t_E) - \langle \Delta Q_{1...3490} \rangle] \frac{\sqrt{3}}{2n_a} h_a^2, \quad (3.15)$$

jossa	$K_{1...349}^{q \text{ lim}}$	polttoaineriippuvien rajoittavien lineaaritehojen varmuuskertoimet vektorissa,
	$\psi_{1...349}^{q,T}$	teoreettiset muotokertoimet vektorissa,
	$Q_{1...3490}^S$	teoreettiset tehotiheydet [W/cm ³],
	$\langle \Delta Q_{1...3490} \rangle$	sovitettujen ja teoreettisten tehotiheyksien ero [W/cm ³],
	h_a	polttoainesauvojen hilaväli [cm],
	n_a	polttoainesauvojen lukumäärä,
	k	nooditaso.

Mitatun ja RESU-98:n laskeman kriittisen booripitoisuuden välillä on myös yleensä pieni
tasoero (muutama ppm). Ennustettu kriittinen booripitoisuus korjataan lähemmäs mitattua
booripitoisuutta samankaltaisella menettelyllä. Toteutuneista arvoista lasketaan kriittisen ja
mitatun booripitoisuuden välinen ero ja vähennetään se ennustetusta kriittisestä booripitoi-
suudesta. Ero lasketaan usean ajankohdan keskiarvona, sillä mitatussa booripitoisuudessa
tapahtuu vaihteluita mittaustarkkuuden takia.

Ennusteen alustaminen voidaan tiivistää seuraaviin pääkohtiin:

- Vuo- ja lähtölämpötilasovituksien kytkeminen pois päältä.
- Termisen tehon arvioiminen TTKE:n tehon nostonopeusrajoitusten perusteella ja
muuttaminen efektiivisiksi keskiarvoiksi.
- Aika-askeleen aikana tuotetun energian määrittäminen.
- Säättävän ryhmän asennon ja RA-paineen tavoitearvojen asettaminen.

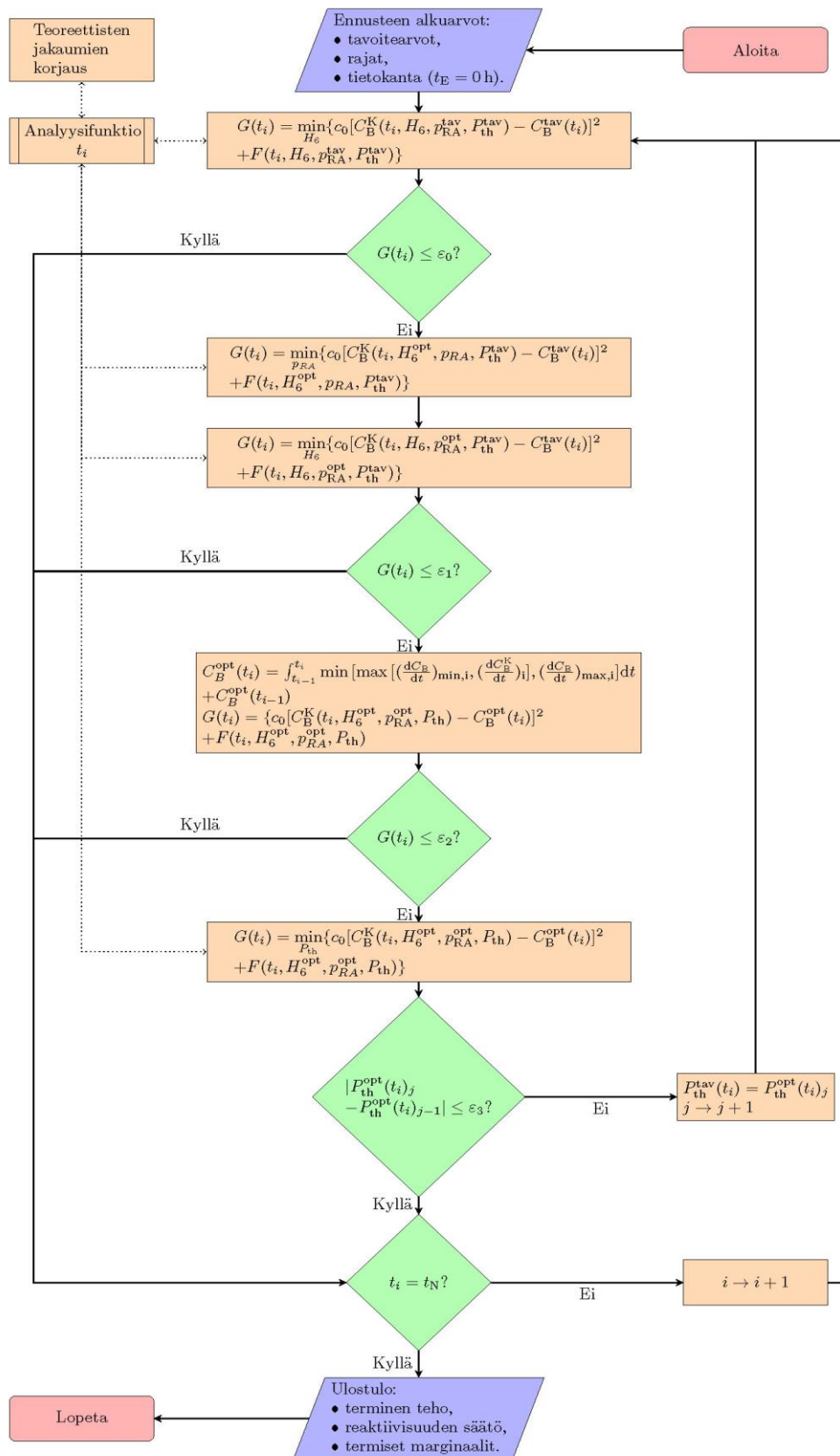
- Keskimääräisen tulolämpötilan laskeminen termisen tehon ja RA-paineen avulla. Jäähdytteen bruttomassavirtauksen arvioiminen tulolämpötilan perusteella.
- Toteutuneiden teoreettisten ja sovitettujen jakaumien välisten erojen laskeminen ennustettujen teoreettisten jakaumien korjaamiseksi.
- Mitatun ja toteutuneen kriittisen booripitoisuuden välisen eron laskeminen ennustetun kriittisen booripitoisuuden korjaamiseksi.

3.3.2 Kriittisyyden haku

RESU-98 olettaa, että reaktori on aina kriittinen laskemalla kompensointiin tarvittavan kriittisen booripitoisuuden. Näin ollen ReactanHelp ei pysty mallintamaan reaktorin kinetiikkaa, vaan arvioi ainoastaan kuinka paljon reaktiivisuuden kompensointiä tarvitaan kriittiseen tilaan.

Ennusteen alustuksessa reaktiivisuuden säätömekanismien asennot asetetaan käyttäjän asettamiin tavoitearvoihin. Alustetut asennot eivät siis ole kuitenkaan lopulliset, sillä transientin aikana reaktiivisuutta joudutaan kompensoimaan lähes jokaisella mekanismilla niiden rajoitteiden takia. Lisäksi TTKE:n tehon nostonopeuksien mukaista tehonnostoa ei voi aina toteuttaa säätövaran tai termisten marginaalien loppuessa.

ReactranHelp:ssä optimaalinen reaktiivisuuden säätö arvioidaan kriittisyyden haulla, jossa jokainen ennusteen alustuksessa luotu nauha/aika-askel käydään läpi yksi kerrallaan. Kuvassa 3.4 näkyvän toimintalogiikan pohjalla on kaksi eri pääoletusta: reaktiivisuuden säädöllä on prioriteettijärjestys ja rajoitteet. Reaktiivisuuteen halutaan ensin vaikuttaa prioriteetin 1. mekanismilla. Rajoitteiden tullessa vastaan eli säätövaran loppuessa, reaktiivisuutta kompensoidaan lisäksi prioriteetin 2. mekanismilla ja niin edelleen. Prioriteettijärjestys riippuu tilanteesta. Jakson alussa reaktiivisuuteen halutaan ensin vaikuttaa säätävällä ryhmällä, sitten booripitoisuutta muuttamalla ja lopuksi tulolämpötilaa muuttamalla eli RA-paineen kautta. Viimeinen vaihtoehto on termisen tehon alentaminen, mikäli säätövara tai termiset marginaalit ehtyvät. Jakson loppupuolella RA-paineen säätö tulee ennen booripitoisuuden säätöä. Primääripiirin booripitoisuus on jo niin alhainen, että sen laimentamiseen tarvittavan laimennusvesiliuoksen määrä kasvaa isoksi. Se johtaa Loviisan käyttöorganisaation mukaan useisiin ongelmiin. Kuvassa 3.4 näkyvässä toimintalogiikassa on esitetty vain jälkimmäinen järjestys selvyyden vuoksi.



Kuva 3.4. Kriittisyyden haun vuokaavio. Prioriteettijärjestyksessä RA-paine ennen booripitoisuuden säätöä.

Säätömekanismeilla voi olla kolme erilaista rajoitusta: vakio tai muuttuva asentorajoitus, nopeusrajoitus sekä termiseen marginaaliin sidonnainen rajoitus. Asentorajoituksia ovat esimerkiksi säätävän ryhmän mekaaninen yläraja ja TTKE:ssa asetettu alin sallittu alaraja häätäsulkumarginaalin takaamiseksi. Nopeusrajoitus on taas esimerkiksi säätösauvan suurin säätönopeus. Termisiin marginaaleihin sidonnainen rajoitus taas tarkoittaa sitä, että esimerkiksi säätävän ryhmän alarajaa nostetaan ylemmäs lineaaritehovaran loppuessa. Nykyinen TTKE:n rajoitus säätävälle ryhmälle on kuitenkin valmiiksi jo niin tiukka, että vaikutus lineaaritehovaraan on marginaalinen. Kuumimman alikanavan lähtölämpötilalla on taas RA-paineen ylärajalle hyvin merkittävä vaikutus. RA-paineen korottaminen nostaa nipun tulo- lämpötilaa, joka taas puolestaan pienentää lähtölämpötilan marginaalia.

Oletukset voidaan huomioida kaavassa 3.16 näkyvän mallin minimoimisella.

$$G(t_i) = c_0 [C_B^K(t_i, H_6, p_{RA}, P_{th}) - C_B^{tav}(t_i)]^2 + F(t_i, H_6, p_{RA}, P_{th}) \quad (3.16)$$

Säätömekanismin kriittinen asento hakeutuu mallin ensimmäisen termin kautta, joka kuvaa korjatun kriittisen booripitoisuuden C_B^K eroa tavoitebooripitoisuuteen C_B^{tav} . Tavoitebooripitoisuudeksi voidaan valita esimerkiksi edellisen aika-askeleen t_{i-1} booripitoisuus, jolloin algoritmi pyrkii minimoimaan muutosta tulevaisuudessa. Toinen vaihtoehto on valita ennustusajankohdan booripitoisuus, jolloin algoritmi pyrkii pitämään booripitoisuuden transientin alun arvossa. Termiä painotetaan kertoimella c_0 mallin hienosäätämiseksi.

Mallin jälkimmäinen osa on sakkotermi, joka huomioi termiset marginaalit. Algoritmin tavoite on minimoida mallia, joten sakkotermi suurentaa mallin arvoa merkittävästi termisten marginaalien ylittyessä. Kaavassa 3.17 näkyvä sakkotermien yleinen muoto on neliösumma termisistä marginaaleista M_i käyttäjän valitsemiin marginaalien rajoihin R_i . Kerroin c_i on nolla marginaalin ollessa suurempi kuin raja ja positiivinen vakio marginaalin ollessa pienempi. Tällä valinnalla mallin arvoa ei turhaan kasvateta marginaalin ollessa suurempi kuin rajoitus.

$$F(t_i, H_6, p_{RA}, P_{th}) = \sum_{i=1}^N \tilde{c}_i (M_i - R_i)^2, \quad (3.17)$$

$$\text{jossa } \tilde{c}_i = \begin{cases} c_i, & (M_i - R_i) \leq 0 \\ 0, & (M_i - R_i) > 0 \end{cases}$$

Kaavassa 3.18 näkyvässä vakiosakkotermissä huomioidaan vain kuumimman alikanavan lähtölämpötila, lineaaritehovara ja nipputehovara. Poikkeuksena yleiseen muotoon kuumimman alikanavan lähtölämpötilan rajoitus asetetaan marginaalin sijasta suoraan lämpötilaan. Käytännössä säätävän ryhmän asento vaikuttaa ainoastaan lineaaritehovaraan, RA-paine kuumimman alikanavan lähtölämpötilaan ja terminen teho lueteltujen lisäksi myös nipputehohon. Vakiosakkotermin minimoiminen on siis hyvin suoraviivaista.

$$\begin{aligned} F(t_i, H_6, p_{RA}, P_{th}) \\ = c_1(T_{smax} - R_T)^2 + c_2(q_a^{marg} - R_q)^2 + c_3(P_a^{marg} - R_P)^2 \end{aligned} \quad (3.18)$$

Toimintalogiikan kuvaavassa vuokaaviossa 3.4 mallin arvo minimoidaan ensin säätävällä ryhmällä. Kriittinen booripitoisuus ja termiset marginaalit aika-askeleessa t_i lasketaan analyysifunktiolla. Sen jälkeen ne korjataan alaluvussa 3.3.1 kuvatulla tavalla. Jos malli saadaan minimoitua pienemmäksi kuin kynnsarvo ε_0 , voidaan mennä suoraan seuraavaan aika-askeleeseen. Mikäli säätövara loppuu ja kynnsarvo ei alitu, siirrytään RA-paineen avulla minimoimiseen. Sakkotermin minimoiminen voi kuitenkin pakottaa booripitoisuuden neliösumman suuremmaksi, joten säätävä ryhmä on iteroitava uudelleen. Mikäli mallin arvo jää tämänkin jälkeen kynnsarvoa ε_1 suuremmaksi, muutetaan lisäksi primääripiirin booripitoisuutta. Sen ylä- ja alaraja saadaan arvioitua edellisen askeleen booripitoisuudesta käyttämällä booraus- ja laimennusfunktiota. Väkevän boorihapon tai laimennusvesiliuoksen syöttö asetetaan maksimiarvoon, jolloin booripitoisuuden muutos on järjestelmän suurin mahdollinen. Mikäli säätävän ryhmän asennon ja RA-paineen hakujen jälkeinen korjattu kriittinen booripitoisuus ei ole arvioitujen rajojen välissä, se asetetaan rajaan kaavan 3.19 mukaisesti.

$$C_B^{\text{opt}}(t_i) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \min \left[\max \left[\left(\frac{dC_B}{dt} \right)_{\min,i}, \left(\frac{dC_B^K}{dt} \right)_i \right], \left(\frac{dC_B}{dt} \right)_{\max,i} \right] dt + C_B^{\text{opt}}(t_{i-1}) \quad (3.19)$$

Vaiheen lopputuloksena valittu booripitoisuus asetetaan uudeksi tavoitebooripitoisuudeksi. Jos uusi booripitoisuus pysyy dynamiikan sallimissa rajoissa ja termiset marginaalit riittävän

isoina, mallin arvo menee nolllaksi. Mikäli mallin arvo ylittää kynnsarvon ε_2 , iteroidaan myös termistä tehoa. Sitä iteroidessa myös aikaisempien säätömekanismien rajat muuttuvat. Esimerkiksi lineaariteho ja kuumimman alikanavan lähtölämpötilat laskevat, kun termistä tehoa lasketaan. Sen johdosta tehon iteroimisen päätteeksi joudutaan palaamaan takaisin kriittisyyden haun alkuun. Tätä toistetaan niin pitkään, kunnes terminen teho ei enää muutu iteroimisen lopputuloksena eli kynnsarvo ε_3 alitetaan.

Kertoimet $c_0 \dots c_3$ sekä kynnsarvot $\varepsilon_0 \dots \varepsilon_3$ täytyy valita yritysten ja erehdyksien kautta, sillä ne vaikuttavat algoritmin konvergoitumiseen ja nopeuteen. Reaktiivisuuden säädölle annetaan vähemmän painoarvoa kuin termisten marginaalien ylittymiselle, joten c_0 valitaan pieneksi arvoksi. Kertoimet $c_1 \dots c_3$ voivat olla tässä suhteessa hyvin suuria arvoja. Näin ollen minimikohta löydetään mahdollisimman läheltä rajoituksia. ε_0 , ε_1 ja ε_3 täytyy olla arvoiltaan pieniä, jotta reaktiivisuuden säätö saadaan ennustettua tarkasti. ε_2 valitaan mielellään suuremmaksi siten, että termisen tehon iterointiin ei mennä liian herkästi. Tehon iteroiminen pidentää huomattavasti laskuaikaa, sillä koko rutiini joudutaan käymään läpi jopa useamman kerran.

Taulukossa 3.2 näkyy valitut kriittisyyden haun mallin painotuskertoimet ja kynnsarvot. Booripitoisuuden eron neliötä tavoitteeseen painotetaan kertoimella 1. Se on siis huomattavasti pienempi verrattuna termisten marginaalien eroja painottaviin kertoimiin. Säätävän ryhmän ja RA-paineen iteroimisen jälkeisiksi kynnsarvoiksi asetetaan arvot 5. Booripitoisuuden valitsemisen jälkeinen kynnsarvo asetetaan arvoon 50. Mikäli tehon iterointia tehdään, se katkaistaan kunnes teho ei muutu enää 0,1 MW:a edellisestä iteroidusta tehosta.

Taulukko 3.2. Valitut kriittisyyden haun mallin painotuskertoimet ja kynnsarvot. * Painottaa lämpötilaeron neliötä.

i	c_i	ε_i
0	1	5
1	10000*	5
2	100000	50
3	100000	0.1

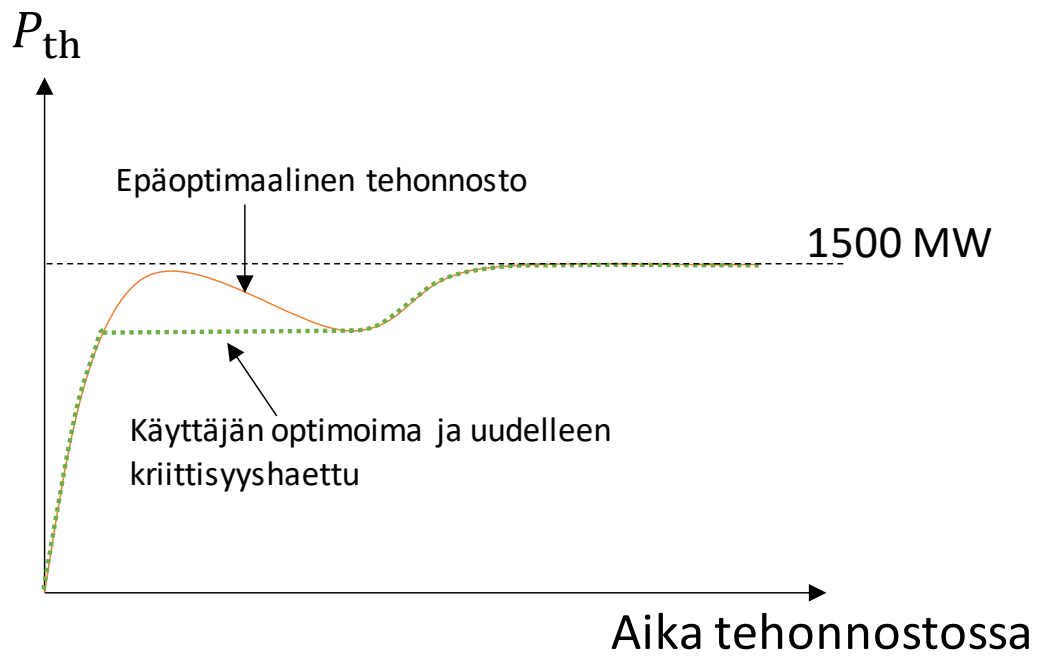
Varsinainen mallin minimoiminen toteutetaan numeerisesti skalaarifunktion minimointiin tarkoitettulla menetelmällä. Lisäksi voidaan olettaa, että mallilla on vain yksi minimi, joten globaalia minimin hakua ei tarvitse suorittaa.

Kokemuksen perusteella "Golden-section search" -menetelmä osoittautui varsin käyttövarmaksi tähän tarkoitukseen. Menetelmässä jaetaan valittua hakuintervallia kultaisen leikkauksen mukaisesti. Ensimmäisen jaon jälkeen suurempi intervalli jaetaan jälleen kultaisen leikkauksen mukaisesti. Mikäli uusimman lasketun leikkauskohdan arvo on suurempi kuin aikaisemman leikkauskohdan arvo, minimin täytyy sijaita ensimmäisen jaon pienemmässä intervallissa. Vastaavasti uusimman arvon ollessa pienempi, minimin täytyy sijaita ensimmäisen jaon suuremmassa intervallissa. Arvon suuruuden perusteella hakuintervalli rajataan ja aloitetaan alusta. Iterointia toistetaan niin pitkään, kunnes katkaisukriteerit täyttyvät. (Wang, 2015).

Paraabelista interpolointia käytetään minimoimisen nopeuttamiseen. Kolmen pisteen avulla voidaan kehittää paraabeli ja laskea sen minimikohta. Ehtona paraabelin kehittämiseksi on se, että yksi arvo sijaitsee kahden muun välissä ja on niitä arvoltaan pienempi. Arvioidun paraabelin minimikohta voi löytyä funktion minimikohdan läheltä. (Wang, 2015).

3.3.3 Sydämen lisästabilointi

Kriittisyyden haussa varmistetaan, etteivät termiset marginaalit ylitä. Termisen tehon iterointi ei kuitenkaan johda aina haluttuun lopputulokseen, sillä kriittisyyden haku suoritetaan aika-askel kerrallaan. Tehon nostaminen, hetken päästä laskeminen ja taas nostaminen ei ole hyvä menettely. Näin ollen kriittisyyden haun jälkeen arvioidaan reaktorin lisästabilointi siten, ettei tehoa tarvitse muuttaa tällä tavalla. Lisästabiloinnissa käyttäjä arvioi tehonnoston uudelleen asettamalla termisen tehon vakioksi tai vakioon gradienttiin. Stabilointitehon ja ajan valitsemiseen voidaan käyttää edellisen kriittisyyden haun tulosta. Mikäli tehonnosto on epäoptimaalinen uuden kriittisyyden haun jälkeenkin, voidaan arvioida taas uusi stabilointi päivitetyn tuloksen pohjalta. Kuvassa 3.5 näkyy havainnollistavat käyrät epäoptimaalisesta ja käyttäjän toimesta optimoidusta tehonnostosta.



Kuva 3.5. Reaktorin tehonnoston optimoimisen havainnekuva.

4 TULOKSET

Tuotteen validoiminen tarkoittaa, että tuote todistetaan vastaavan alkuperäistä käyttötarkoitustaan ja käyttäjien vaatimuksia. Lisäksi tuotteen täytyy noudattaa oikeita fysikaalisia malleja ja oletuksia. Validoinnin voi siis tiivistää seuraavasti: olenko tekemässä oikeaa tuotetta? Verifiointi tarkoittaa taas, että tuote vastaa sen spesifikaatiota: olenko tekemässä tuotetta oikein? (IEEE, 2017 ss. 19-20).

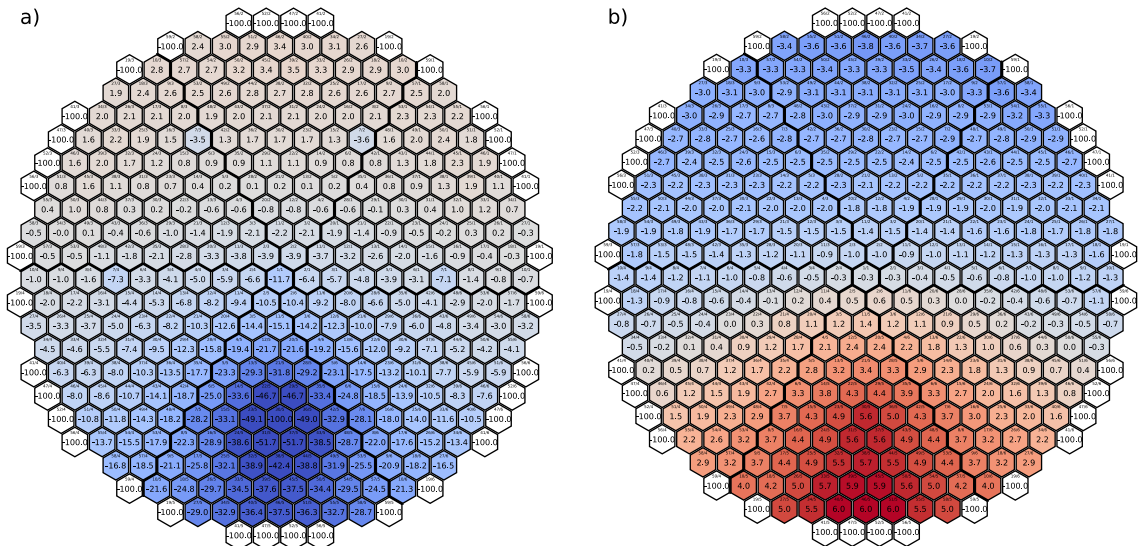
Tehokas tapa varmistaa, että ohjelma noudattaa käyttäjien vaatimuksia on testitapaukset. Ne voidaan määrittellä olevan setti syötteitä, ehtoja ja odotettuja tuloksia. (IEEE, 2017 s. 37). Tässä tapauksessa analyysi- ja ennustusfunktio voidaan siis validoida transientitilanteesta saaduilla mittausarvoilla. Työkalun validoinnissa käytettävä tapaus esitellään alaluvussa 4.1.

Alaluvussa 4.2 validoidaan analyysifunktio eli pyritään vastaamaan vaatimukseen toistettujen suoritusarvolaskennan tulosten tarkkuudesta. Alaluvussa 4.3 booraus- ja laimennusfunktio verifioidaan eli varmistetaan, että funktio toimii identtisesti Excel-pohjaisen työkalun kanssa. Alaluvussa 4.4 validoidaan ennustusfunktio eli pyritään vastaamaan vaatimukseen, joita ovat ennustettujen termisten marginaalien riittävä tarkkuus, kyvyt arvioida optimaalisempi reaktiivisuuden säätö ja lisästabiloinnin tarve.

4.1 Validoinnissa käytettävä tapaus

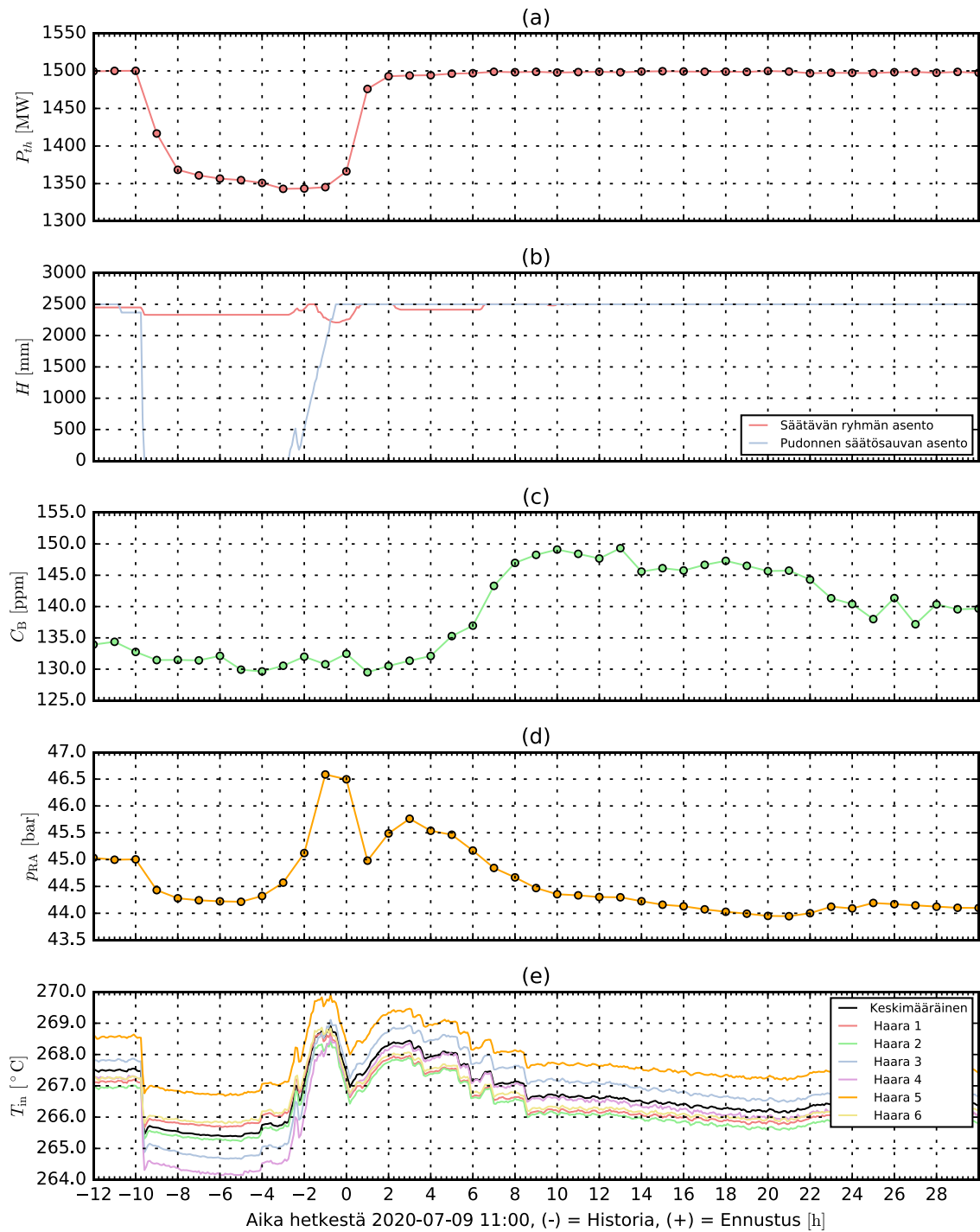
Analyysi- ja ennustusfunktion validointitapauksena toimii Loviisa-1:n käyttöjakson 43 loppupuolella (9.7.2020 klo 00.13) tapahtunut tilanne, jossa yksi ryhmän 2 säätösauvoista tippui mekaaniselle alarajalle pientaajuusmuuttajan häiriön takia. Myöhäisen ajankohdan takia taajuusmuuttajan vaihto pitkittyi, jonka seurauksena säätösauva saatiin takaisin yläasentoon vasta noin yhdeksän tunnin jälkeen tipahtamisesta. Terminen teho rajoittui TTKE:n mukaisesti noin 92 %:n tehotasolle. (Lehtinen;ym., 2020). Tipahtaneen säätösauvan vaikutus sai säätösauvan lähettyvillä olevien polttoainennippujen tehot laskemaan kuvan 4.1 (a) sydänkarttakuvan mukaisesti. Nipputehot laskivat viereisissä nipuissa jopa yli 50 % ja joitakin prosentteja koko sydämen puolikkaassa. Tämän seurauksena nippujen ksenonpitoisuudet kasvoivat normaalia suuremmaksi ja jodin tuotanto hiipui merkittävästi. Yhdeksän tuntia myöhemmin juuri ennen tehonnostoa ksenonpitoisuudet olivat kääntyneet jo laskuun ja jodipitoisuudet laskeneet huomattavasti alemmas. Tehonnoston aikana vahvistuva neutronivuo sai ksenonpitoisuudet laskemaan nopeasti normaalin tasapainon alapuolelle johtuen

tasapainoa vähäisemmästä jodipitoisuudesta. Alhainen ksenonpitoisuus nipuissa sai puolestaan reaktiivisuuden kasvamaan ja tehon painottumaan enemmän niihin kuvan 4.1 (b) sydänkarttakuvan mukaisesti. Nipputehot olivat enimmillään jopa 6 % suuremmat verrattuna tilanteeseen ennen säätösauvan tipahtamista. Tämän seurauksena kuumimman alikanavan lähtölämpötila nousi arvoon 324,9 °C eli lähelle TTKE:n ylärajaa 325 °C.

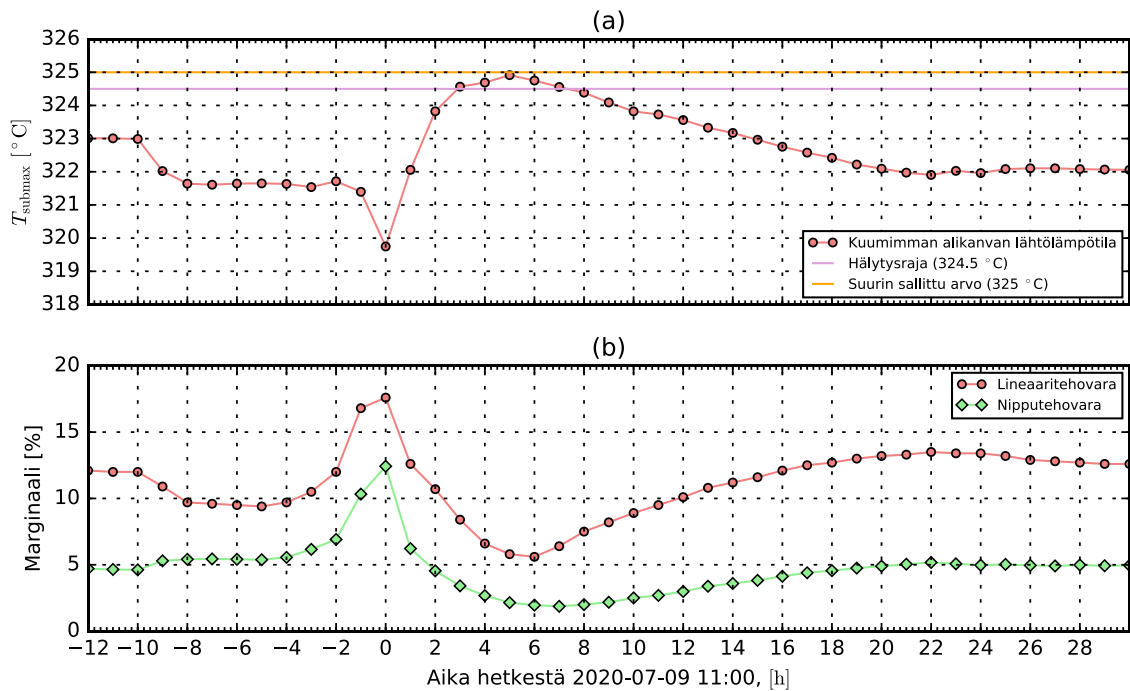


Kuva 4.1. Nipputehokojen suhteellinen ero (%) verrattuna hetkeen ennen säätösauvan tipahtamista. (a) Säätösauva juuri tippunut. (b) 7 tuntia tehonnostosta. Sydämen reunalla näkyvät sijainnit (arvoilla -100 %) ovat suojaelementtejä. Karttakuvat on laskettu analyysifunktiolla.

Kuvista 4.2 ja 4.3 voi hahmottaa tarkemman kulun validointitapauksesta. Kuvat sisältävät mittausarvoja sekä laskennallisia suureita. Kuvien data kattaa aikavälin 8.7.2020 klo 23.00 - 10.7.2020 klo 5.00 eli se alkaa tunti ennen säätösauvan tipahtamista ja päättyy 29 tuntia tehonnoston jälkeen. Mittausarvot ovat efektiivisiä tunnin ja 5 minuutin keskiarvoja RA-painetta lukuun ottamatta. Yksi keskiarvoistettu mittausarvo kuvaa edellistä tuntia tai 5 minuuttia. Laskennalliset suureet, kuten kuumimman alikanava lähtölämpötila, lineaaritehovara ja nipputehovarot ovat taas tuntikohtaisia laskennan tuloksia. Näin ollen efektiiviset keskiarvot ja laskennalliset suureet eivät näytä olevan samassa vaiheessa. Selvyiden vuoksi kuvissa on käytetty ajan yksikkönä aikaeroa hetkestä 9.7.2020 klo 11.00. Tässä ajankohdassa tippunut säätösauva saatiin nostettua ylös ja tehonnosto aloitettiin, eli se on sopiva ajanhetki luoda ennuste reaktorin käyttäytymisestä.



Kuva 4.2. (a) Energiataseesta laskettu reaktorin terminen teho tunnin efektiivisinä keskiarvoina. (b) Tapahtuneen säätösauvan ja säätävän ryhmän asennot 5 minuutin efektiivisinä keskiarvoina. (c) Booripitoisuus primääripiirissä tunnin efektiivisinä keskiarvoina. (d) RA-paine tunnin keskiarvoina. (e) Kylmähaaroista tulevan jäähdytteen lämpötilat ja keskimääräinen lämpötila 5 minuutin efektiivisinä keskiarvoina.



Kuva 4.3. (a) Kuumimman alikanavan lähtölämpötila tunnin tarkkuudella, hälytysraja (324,5 °C) ja suurin sallittu arvo (325 °C). (b) Polttoainesauvan lineaaritehovara sekä nipputehovara tunnin tarkkuudella. Lineaaritehon suurin sallittu arvo perustuu palamaan ja nipputehon suurin sallittu arvo on 6,8 MW.

Kuvasta 4.2 (b) huomataan, että ryhmän 2 säätösauva on tipahtanut ensin vain hieman alas-päin. Tämä ei vielä aiheuttanut tehonrajoitustoimenpiteitä laitoksella, vaan sauva yritettiin saada takaisin ylös. Tunnin päästä säätösauva kuitenkin tipahti pohjaan asti ja reaktorin termi-nen teho laskettiin 92 %:n tasolle. Tipahtaneen säätösauvan negatiivinen vaikutus reaktii-visuuteen kompensoitiin jäähdytteen keskimääräistä tulolämpötilaa laskemalla arvosta 267,5 $^{\circ}\text{C}$ arvoon 265,5 $^{\circ}\text{C}$ kuvan 4.2 (e) mukaisesti hetkessä -9,5 tuntia. Sen laskeminen toteutettiin RA-painetta laskemalla noin 0,5 bar kuten kuvasta 4.2 (d) nähdään. Kuvasta 4.2 (e) huoma-taan myös, että kylmähaarojen väliset lämpötilaerot kasvoivat tehon pienentyessä johtuen höyrystimien välisistä eroista ja mittaustarkkuudesta. Kaikki kiertovesipumput pysyivät käynnissä tilanteen aikana, joten jäähdytteen massavirtaus sydämeen vaihteli tiheyden mu-kaan arvojen 8440 ... 8530 kg/s välillä.

Säätösauvan taajuusmuuntajan korjaaminen vei noin kuusi ja puoli tuntia, jonka aikana boo-ripitoisuus ja RA-paine pidettiin lähestulkoon vakiona kuvan 4.2 (c) ja (d) mukaisesti. Boo-ripitoisuus oli jakson loppupuolella jo niin alhainen, että sen mittaamisen epätarkkuus on suhteellisesti suuri (noin 2...5 ppm vaihtelu). Säätösauvaa aloitettiin nostamaan yläasentoon

ajankohdassa -2,75 tuntia. Nostonopeus oli 20 mm/s, mutta ohjeiden mukaan säätösauva täytyi pysäyttää kymmeneksi minuutiksi aina 200 millimetrin välein. Samanaikaisesti säätösauvan positiivista reaktiivisuusvaikutusta kompensoitiin nostamalla RA-painetta arvoon 46,6 bar. Keskimääräinen tulolämpötila muuttui arvosta 265,8 °C arvoon 268,9 °C. Myös säätösauvojen säätävällä ryhmällä kompensoitiin reaktiivisuutta pudonneen säätösauvan noston aikana.

Tehonrajoituksesta noston aloittamiseen meni yhteensä noin yhdeksän tuntia, joten tehoa nostettiin TTKE:n mukaisesti gradientilla 60 MW_e/h, mutta hitaammin lähellä nimellistehoa. Tehon negatiivinen vaikutus reaktiivisuuteen kompensoitiin ensisijaisesti nostamalla säätävä ryhmä yläasentoon, sekä laskemalla RA-painetta arvoon 45 bar keskimääräisen tulolämpötilan laskemiseksi arvoon 267 °C. Ksenonpitoisuuden pienentymistä reaktorissa kompensoitiin puolestaan RA-painetta nostamalla noin tunnin jälkeen tehonnoston aloituksesta. Ajankohdassa 3 tuntia kuumimman alikanavan lähtölämpötilan huomattiin kuitenkin ylittävän hälytysrajan 324,5 °C (katso kuva 4.3 (a)). Sen seurauksena sitä pyrittiin hillitsemään laskemalla RA-painetta. Kuumimman alikanavan lähtölämpötila saavutti suurimman arvonsa 324,9 °C ajankohdassa 5 tuntia.

Ksenonpitoisuuden kompensoimiseksi jouduttiin käyttämään booria, kuten kuvasta 4.2 (c) nähdään. Primääripiirin booripitoisuuden nostaminen aloitettiin suunnilleen samaan aikaan RA-paineen laskemisen kanssa ja nostettiin noin arvosta 132 ppm arvoon 150 ppm asti. Tämän jälkeen primääripiiriä alettiin laimentamaan puhtaalla vedellä sitä mukaan, kun ksenonpitoisuus sydämessä palautui normaaliin tasapainoonsa.

Kuvasta 4.3 (b) nähdään, että lineaariteho- ja nipputehovara saavuttivat alimman arvonsa noin kuuden tunnin jälkeen tehon nostamisen aloituksesta. Se tarkoittaa, että ksenonpitoisuudet pudonneen säätösauvan läheisissä polttoainepuissa saavuttivat alimman arvonsa samaan aikaan. Rajoittavimman polttoainesauvan lineaaritehovara kävi alimmillaan arvossa 5,5 % ja nipputeho korkeimmillaan noin 6,66 MW:ssa, eli 2 %:n päässä nipputehorajasta (6,8 MW).

Kuten edellä kerrotusta voi päätellä, tehon nostaminen tapahtui Loviisan voimalaitoksella tietämättä riittävän tarkasti etukäteen, kuinka termiset marginaalit muuttuvat. Jos operaattoreilla olisi ollut tietoa kuumimman alikanavan lähtölämpötilan kehittymisestä,

reaktiivisuuden säädön suhteen olisi voitu ennakoida paremmin. RA-paine olisi kannattanut asettaa alemmas ja booripitoisuutta kasvattaa aikaisemmin.

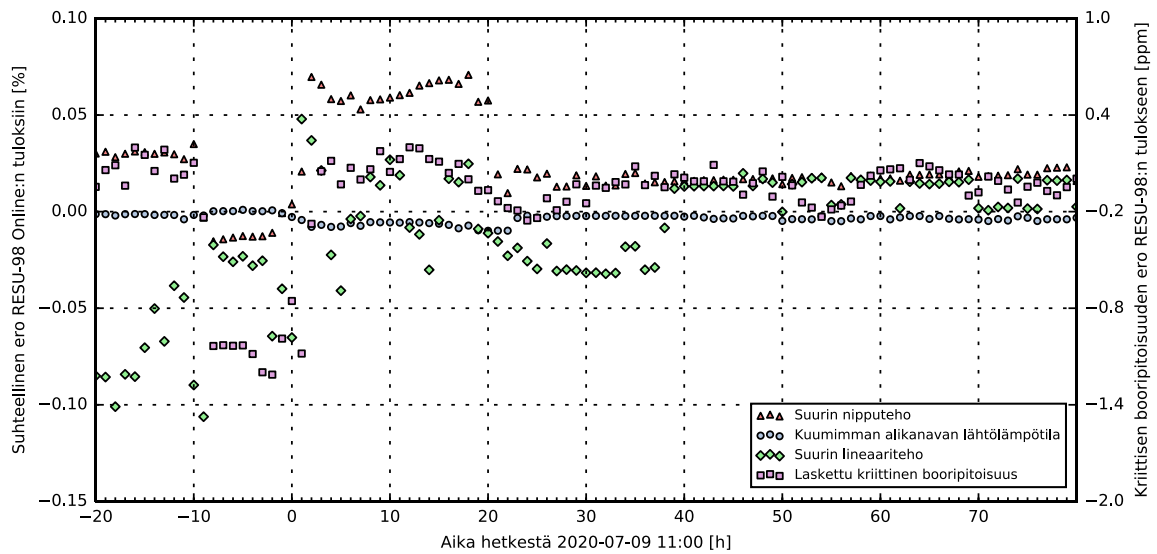
4.2 Reaktiivisuustransienttien analyysifunktion validointi

Analyysifunktio validoidaan toistamalla esiteltyjen laskennallisten suureiden laskenta. Esiteltyjen mittausarvojen lisäksi käytetään sydämen lähtölämpötilamittauksia YQ30T ja neutronivuomittauksia YQ20X teoreettisten teho- ja vuojakaumien sovittamiseen.

Jakson alun tietokantaa päivitetään ensin viikon pituisilla efektiivisillä keskiarvoilla ajankohtaan 6.7.2020 kello 0:00 asti. Siitä eteenpäin tietokantaa päivitetään tunnin pituisilla efektiivisillä keskiarvoilla. Energiaa korjataan 1500 MWh:n verran RENO-toiminnolla, sillä eri pituisten keskiarvojen välille jää yhden tunnin katkos.

Kuvassa 4.4 verrataan tärkeimpiä tuloksia Loviisan ydinvoimalaitoksella tapahtuvan suoritusarvolaskennan tuloksiin. Vertailu kattaa 20 tuntia ennen ja 80 tuntia jälkeen ajankohtaa 9.7.2020 kello 11:00. Tärkeimpiä tuloksia ovat suurin nippu- ja lineaariteho, kuumimman alikanavan lähtölämpötila sekä laskettu kriittinen booripitoisuus. Kriittisen booripitoisuuden ero viittaa hyvin laskennan tarkkuuteen, sillä siihen vaikuttaa käytännössä kaikki tilaparametrit. Vertailu on toteutettu suhteellisina eroina Loviisan voimalaitoksen suoritusarvolaskennan tuloksiin. Poikkeuksena kriittisen booripitoisuuden vertailu, joka on toteutettu absoluuttisena erona. Kuumimman alikanavan lähtölämpötilan suhteellinen ero on laskettu celsiusasteilla.

Kuvasta huomataan, että laskennalliset suureet lasketaan uudelleen hyvällä tarkkuudella. Suureet poikkeavat eniten reaktiivisuustransientin aikana välillä 0 ... 22 tuntia sekä ennen termisen tehon nostamista välillä -10 ... 0 tuntia. Suurin ero kuumimman alikanavan lähtölämpötilassa on noin -0,01 % hetkessä 20 tuntia. Suurin nipputeho eroaa enimmillään 0,07 % hetkessä 18 tuntia. Suurimmassa lineaaritehossa huomataan enemmän vaihtelua ennen tehon nostamista. Lineaaritehon suurin suhteellinen ero on -0,011 % hetkessä -9 tuntia, jolloin termistä tehoa laskettiin. Kriittinen booripitoisuus eroaa suurimmillaan -1,2 ppm hetkessä -2 tuntia eli hieman ennen termisen tehon nostamista. Tehonnoston aikana ja sen jälkeen ero on alle 0,1 ppm.



Kuva 4.4. Analyysifunktiolla laskettujen laskennallisten suureiden vertailu Loviisan ydinvoimalaitoksella tapahtuvan suoritusarvolaskennan tuloksiin. Kriittisen booripitoisuuden absoluuttinen ero oikealla pystyakselilla.

Erot ovat merkitsemättömän pieniä, sillä esimerkiksi nipputehossa ero huomataan vasta kolmannessa desimaalissa. Myös 1 ppm:n ero kriittisessä booripitoisuudessa on merkitsemätön. Esimerkiksi booripitoisuuden mittausta voi vaihdella jopa 5 ppm kuvan 4.2 perusteella. Lisäksi tärkeä huomio tuloksesta on, että erot eivät kasva ajan edetessä. Näin ollen algoritmissa ei ole tekijöitä, joiden kumuloitunut vaikutus ajan mittaan saisi laskennan eroamaan. Yksi tekijä voisi olla esimerkiksi virheellinen energian päivittäminen.

Eroille on kaksi eri selitystä. Loviisan ydinvoimalaitoksella tapahtuva suoritusarvolaskenta määrittää yhden polttoainepölyn sisäiset muotokertoimet tunti kerrallaan. Toisaalta RESU-98 Offline määrittää kertoimet jokaiselle nipulle joka laskentakerralla. Ne ovat tässä mielessä tarkempia verrattuna laitoksella tapahtuvan suoritusarvolaskennan kertoimiin, sillä ne voivat muuttua transientin aikana. Toinen selitys eroille on tiedonsiirron katkaisuvirheet. RESU-98 Online-versioon mittausarvo syötetään tavalla, jolla mittausarvot saadaan käyttöön ilman arvojen katkaisemista tai pyöristämistä. Offline-versiossa taas mittaukset voidaan syöttää enintään kuuden desimaalin tarkkuudella RML-mittausnauhalle lukuun ottamatta YQ20X-mittauksia, jotka voidaan syöttää vain kolmen desimaalin tarkkuudella. RML-nauha on käyttäjäystävällisempi tapa syöttää mittausarvoja, mutta toisaalta tiedonsiirron tarkkuudesta joudutaan tinkimään.

Tuloksista vedetään johtopäätös, että laskennan toistaminen onnistuu erittäin hyvällä tarkkuudella. Näin ollen ensimmäinen tavoite täyttyy. Tämä on hyvä lähtökohta reaktiivisuustransientin ennustusfunktion toteutukselle.

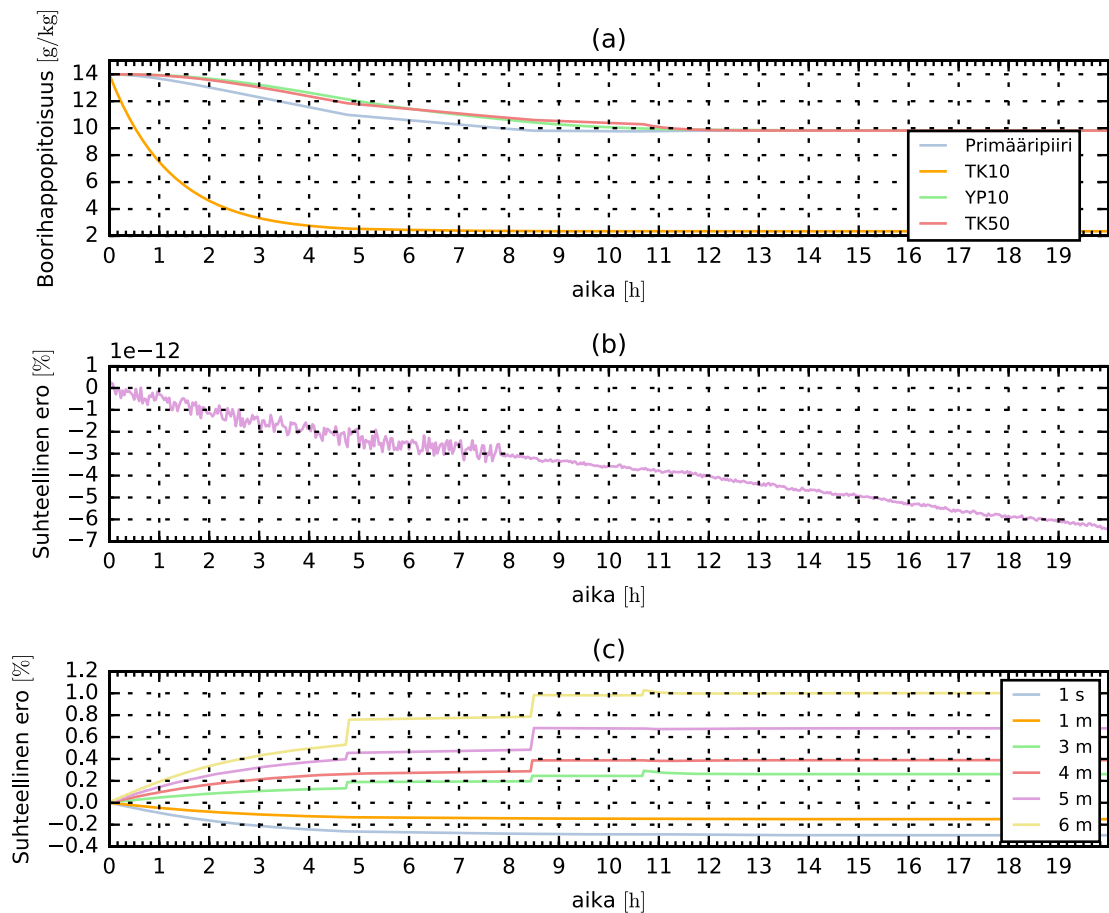
4.3 Booraus- ja laimennusfunktion verifiointi

Booraus- ja laimennusfunktion verifiointiin käytetään kahta generistä tilannetta, joissa laimennusveden tai boorihapon syötön massavirtauksen muuttuminen ja sekoitusvaihe tulevat katetuksi. Tilanteet lasketaan nykyisellä Excel-pohjaisella työkalulla ja toistetaan uudella funktiolla. Funktion eksplisiittisen menetelmän aika-askeleiden pituus asetetaan kahteen minuuttiin, eli Excel-työkalua vastaavaksi. Näin ollen verifiointi voidaan toteuttaa suoraan arvioitujen boorihappopitoisuuksien vertaamisella jokaisessa ajanhetkessä. Lisäksi suoritetaan herkkyysanalyysi käyttämällä eri aika-askeleen pituuksia ja vertaamalla tuloksia Excel-työkalun tuloksiin.

Laimennusvaiheen tilanteen alussa järjestelmän osien boorihappopitoisuus on arvossa 14 g/kg. TD10-säiliöstä tulevan laimennusveden pitoisuus on 2,3 g/kg. Laimennusveden syötön massavirtaus on alussa 4 kg/s, mutta vaihtuu arvoon 2 kg/s hetkessä 4 tuntia 48 minuuttia ja arvoon 0,3 kg/s hetkessä 8 tuntia 28 minuuttia. Luetelluista viimeisessä kokeillaan kuinka funktio toimii syötön ollessa pienempi kuin tiivistevesien massavirtaus (< 1 kg/s). Lopuksi hetkessä 10 tuntia 42 minuuttia syöttö asetetaan arvoon 0 kg/s eli funktion sekoitusvaiheen toimivuutta kokeillaan.

Boorausvaiheen tilanteen alussa järjestelmien osat asetetaan boorihappopitoisuuteen 2 g/kg TK10-säiliötä lukuun ottamatta, jonka pitoisuus asetetaan 40 g/kg eli vahvaksi boorihapoksi. TD10-säiliöstä tulevasta säiliöstä oletetaan myös tulevan vahvaa boorihappoa. Alussa sitä syötetään massavirtauksella 2 kg/s mutta vaihdetaan arvoihin 1 kg/s, 0,3 kg/s ja 0 kg/s samoissa ajanhetkissä kuin laimennusvaiheen tilanteessa.

Laimennusvaiheen tulokset näkyvät kuvassa 4.5. Ylimmässä alikuvassa (a) on järjestelmän osien boorihappopitoisuudet ajan funktiona. Kesimmäisessä alikuvassa (b) on funktiolla arvioidun primääripiirin boorihappopitoisuuden suhteellinen ero Excel-pohjaisella työkalulla arvioituun pitoisuuteen. Alimmassa alikuvassa (c) on herkkyysanalyysin tulokset, joista ilmenee vastaava ero, mutta eri askelpituuksilla. Kuvassa 4.6 nähdään samat tulokset boorausvaiheen tilanteelle.



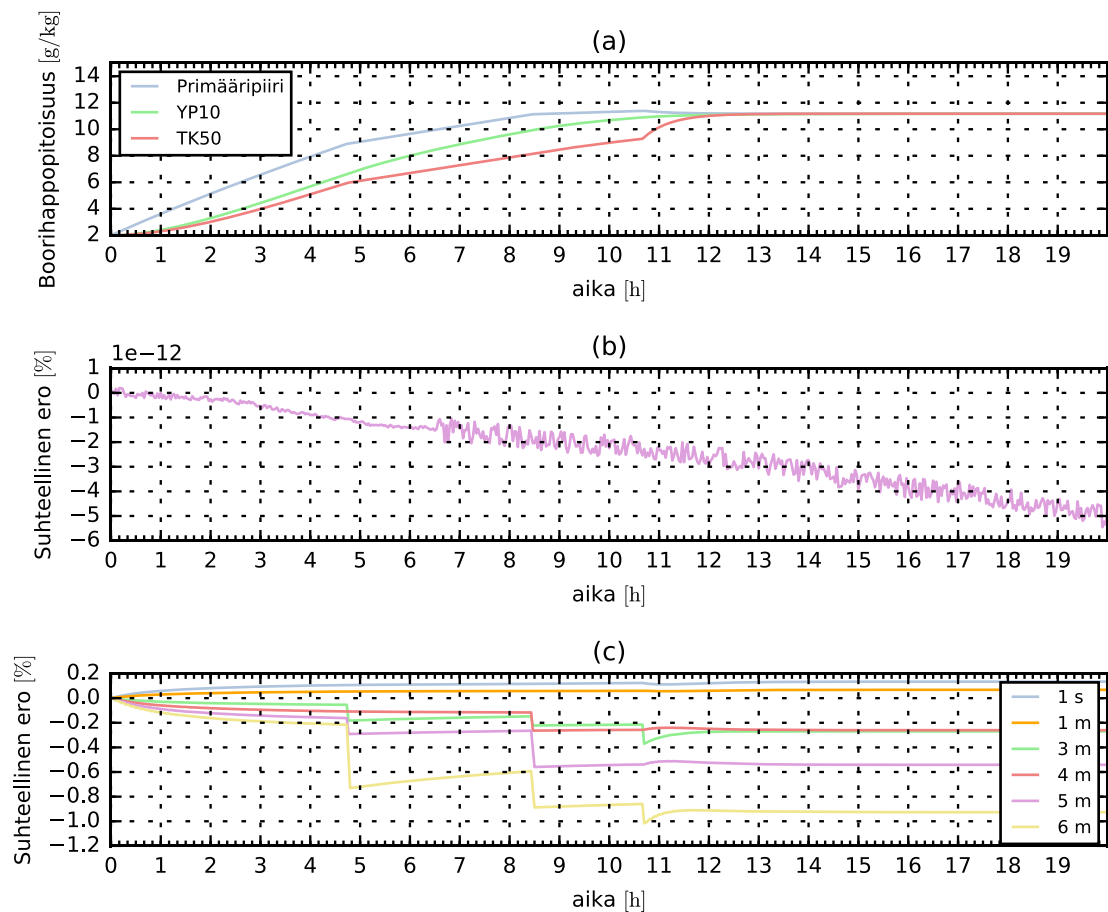
Kuva 4.5. (a) Funktiolla laskettu tulos laimennusvaiheen tilanteelle. (b) Primääripiirille arvioidun boorihappopitoisuuden suhteellinen ero Excel-työkalun tulokseen. (c) Herkkyysanalyysi: eri askelpituuksilla arvioitujen primääripiirin boorihappopitoisuuksien suhteellinen ero Excel-työkalun tulokseen.

Kuvasta 4.5 nähdään, että uusi funktio tuottaa laimennusvaiheesta lähes identtiset tulokset Excel-pohjaisen työkalun kanssa. Alikuvassa (b) näkyvä ero kasvaa tasaisesti johtuen siitä, että Excel käyttää laskennassa vähemmän desimaaleja verrattuna Python3:een. Lisäksi kokonaislukujen merkkien lisääntyessä Excel alkaa käyttämään yhä vähemmän desimaaleja. Esimerkiksi yhden merkin kokonaisluvut (1 - 9) ilmoitetaan 14 desimaalin tarkkuudella kun taas kahden merkin kokonaisluvut (10 - 99) vain 13 desimaalin tarkkuudella. Tällä voidaan selittää ajanhetkessä 8 tuntia eron värinän vaimeneminen, koska primääripiirin boorihappopitoisuus laskee alle 10 g/kg samalla hetkellä.

Kuvan 4.5 alikuvasta (c) nähdään, että booripitoisuus yliarvioidaan pidemmillä aika-askelilla. Tämä on eksplisiittiselle menetelmälle tyypillistä, sillä se käyttää seuraavan arvon

lineaariseen approksimoimiseen aikaisemmin ratkaistua arvoa. Virheet voivat kasvaa kohdissa, joissa laimennusvesiliuoksen massavirtausta TD10-säiliöstä pienennetään. Se johtuu siitä, että massavirtauksen muutos toteutetaan väärässä ajankohdassa pitkän aika-askelen takia. Funktio ei vaikuttaisi olevan kuitenkaan kovin herkkä, vaikka aika-askel jopa kolminkertaistettaisiin. 1 %:n yliarviointi tasapainotilanteeseen mennessä on hyvin pieni ero kun otetaan huomioon, että työkalulla ei ole voitu ennustaa järjestelmän dynamiikan käyttäytymistä kovin tarkasti.

Odotetusti primääripiirin booripitoisuus arvioidaan Excel-työkalua pienemmäksi lyhyemmillä aika-askelilla. Esimerkiksi yhden sekunnin askelilla eroa on tasapainoon mennessä noin -0,3 %. Työkalun tarkkuutta voidaan siis vielä parantaa pienentämällä aika-askelta.



Kuva 4.6. (a) Funktiolla laskettu tulos boorausvaiheen tilanteelle ja (b) primääripiirille arvioidun boorihappopitoisuuden suhteellinen ero Excel-pohjaisen työkalun tulokseen. (c) Herkkyysanalyysi: eri askelpituuksilla arvioitujen primääripiirin boorihappopitoisuuksien suhteellinen ero Excel-työkalun tulokseen.

Kuvasta 4.6 näkyvistä tuloksista havaitaan, että funktio toimii myös boorausvaiheessa lähes identtisesti Excel-työkalun kanssa. Alikuvassa (b) näkyvä virheen värähtely on tällä kertaa ensin vaimeampaa ja voimistuu kun primääripiirin boorihappopitoisuus nousee yli 10 g/kg ajankohdassa 6 tuntia ja 30 minuuttia. Alikuvassa (c) havaitaan, että pidemmällä aika-askelilla primääripiirin boorihappopitoisuutta puolestaan aliarvioidaan. Lyhyemmällä aika-askelilla voidaan parantaa tulosta noin 0,1 %.

Tuloksista vedetään johtopäätös, että funktio toimii täysin samalla tavalla kuin Excel-pohjainen työkalu. Kaikki mahdolliset tilanteet katettiin, joten funktio voidaan todeta verifioituksi. Työkalu käyttäytyy stabiilisti myös paljon pidemmällä aika-askelilla, mutta funktiolle se asetetaan yhteen sekuntiin tarkkuuden ja vakauden maksimoimiseksi. Excel-työkalussa käytettyä aika-askelta lyhyemmän aika-askeleen ei havaittu pidentävän laskuaikaa merkittävästi.

4.4 Reaktiivisuustransienttien ennustusfunktion validointi

Ennustusfunktion validointi suoritetaan kolmessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa pyritään toteamaan ennustusfunktion vaadittu tarkkuus kuumimman alikanavan lähtölämpötilan, lineaaritehovaran ja nipputehovaran suhteen. Myös jäädytteen tulolämpötilan ja bruttomassavirtauksen korrelaatioiden tarkkuutta tarkastellaan. Oletuksena hyvälle tarkkuudelle on, että luvussa 3.3.2 esitellyn sakkotermin (kaava 3.18) marginaalirajoituksista voidaan käyttää kohtuullisen pieniä arvoja.

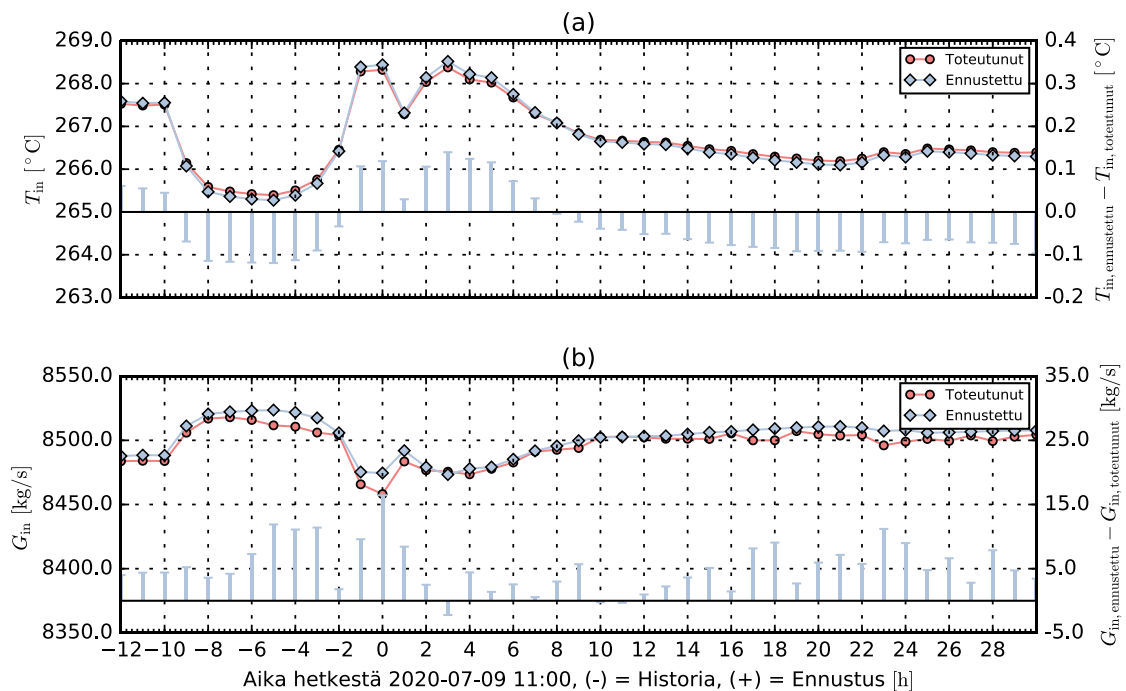
Kunnes ReactranHelp:n riittävä ennustetarkkuus on todettu, voidaan sen jälkeen ennustaa myös reaktiivisuudelle optimaalinen säätö käyttäen samaa validointitapausta. Arvioitua säätöä voidaan verrata toteutuneeseen kvalitatiivisesti. Käytännössä ennusteen pitäisi olla niin hyvä, että tehonnosto voitaisiin suorittaa optimaalisemmin suuremmilla termisillä marginaaleilla.

Viimeisessä validointivaiheessa marginaalien rajoituksia tiukennetaan, jolloin algoritmin täytyy iteroida myös termistä tehoa. Tuloksen pohjalta tehonnostoon lisätään lisästabilointi luvussa 3.3.3 kuvatulla tavalla.

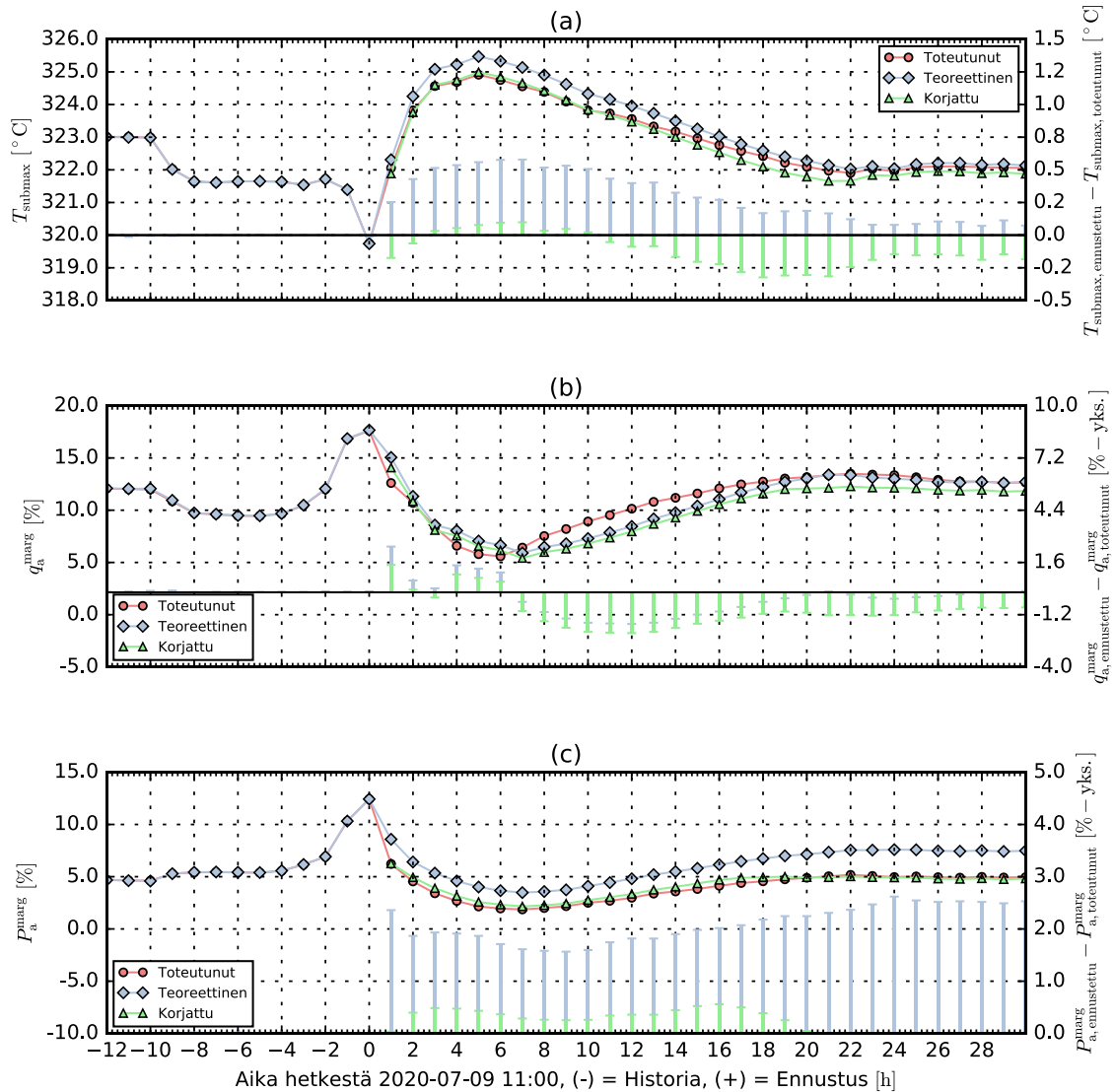
4.4.1 Ennustetarkkuuden arviointi

Tarkkuuden arviointi voidaan toteuttaa vertaamalla ennusteena saatuja laskennallisia suureita toteutuneisiin suureisiin. Tarkkuuden kannalta kriittisimmät kohdat ovat marginaalien minimikohdat ajan suhteen. Tässä vaiheessa reaktiivisuuden säätöä ei kuitenkaan ennusteta eli reaktorin termisestä tehosta, säätösauvojen asennoista sekä RA-paineesta käytetään toteutuneita arvoja. Tällä menettelyllä ennustetut ja toteutuneet parametrit ovat paremmin vertailtavissa keskenään, sillä reaktiivisuuden säätö vaikuttaa niihin.

Käyräkuviissa 4.7 ja 4.8 on vertailtu ennustettuja parametreja toteutuneisiin. Kuvien aika-akselin nollassa hetki vastaa ennustuksen aloitusaikaa. Tässä tapauksessa ennustus aloitettiin hetkessä klo 11.00, eli noin puoli tuntia pudonneen säätösauvan nostamisen jälkeen. Negatiiviset aika-akselin arvot tarkoittavat siis menneisyyttä ennen ennustuksen luomista ja positiiviset ennustettua tulevaisuutta. Selvyyden vuoksi arvoista ennen ennustusajankohtaa puhutaan nimellä historia ja jälkeen nimityksellä tulevaisuus.



Kuva 4.7. (a) Ennustettu keskimääräinen jäähdytteen tulolämpötila ja (b) bruttomassavirtaus. Kuvaan on piirretty toteutuneet ja ennustetut arvot (käyräkuvaajat, vasemmat pystyakselit) sekä ennustetun absoluuttinen ero toteutuneeseen (pylväskuvaajat, oikeat pystyakselit).



Kuva 4.8. (a) Ennustettu kuumimman alikanavan lähtölämpötila, (b) lineaaritehovara ja (c) nipputehovara. Kuvaan on piirretty toteutuneet ja teoreettiset arvot sekä sovitettujen jakaumien avulla korjattut arvot (käyräkuvaajat, vasemmat pysty akselit). Kuvassa näkyy myös teoreettisten sekä korjattujen arvojen absoluuttinen ero toteutuneeseen. (pylväskuvaajat, oikeat pysty akselit).

Kuvassa 4.7 (a) on korrelaation 3.9 avulla arvioitu keskimääräinen tulolämpötila. Myös historialle on tässä tapauksessa laskettu tulolämpötila, jotta korrelaation käyttäytymistä voidaan tarkastella myös alemmalla teholla (1350 MW). Kuvasta voi päätellä, että korrelaatio toimii hyvin tilanteen koko tehoalueella 1350 ... 1500 MW ja RA-painella väliltä 44 ... 46,5 bar. Tämä painealue vastaa melkein koko operointialuetta. Suurin absoluuttinen ero korrelaation ja mitatun välillä on arvoltaan noin 0,14 °C kohdassa 3 tuntia ennustuksen aloittamisesta,

jolloin terminen teho on 1493 MW ja RA-paine 45,8 bar. Korrelaatiolla laskettu tulolämpötila on mitattua suurempi kuumimman alikanavan lähtölämpötilan maksimikohdassa. Näin ollen se on hieman konservatiivinen tästä näkökulmasta (ero 0,12 °C maksimin kohdalla). Lämpötilaerot ovat kuitenkin niin mitättömiä, että kylmähaarojen lämpötilamittauksien toleranssit voivat olla suuremmat.

Korrelaation toimivuudesta alhaisilla tehoilla (alle 1350 MW) ei voida arvioida tämän tilanteen perusteella, mutta toisaalta kuumimman alikanavan lähtölämpötilan raja on todennäköisempää ylittyä lähellä nimellistehoa. Lisäksi samaa korrelaatiota on jo käytetty tulolämpötilan ennustamiseen reaktiivisuuden näkökulmasta Excel-pohjaisessa reaktiivisuuden hallintatyökalussa.

Kuvassa 4.7 (b) on korrelaatiolla 3.12 arvioitu jäädytteen bruttomassavirtaus sydämeen. Massavirtaus on arvioitu tulolämpötilan korrelaatiolla tuotetuista arvoista ja vastaavalla tavalla myös historialle. Kuvasta voi päätellä, että korrelaatio toimii riittävän tarkasti. Suurin ero mitatun ja ennustetun välillä on noin 16,5 kg/s hetkessä 0 tuntia. Tämä on hyvin pieni ero ottaen huomioon, että bruttomassavirtaus on noin 8500 kg/s luokkaa koko tilanteessa. Ero on lähes mitätön kohdassa, johon kuumimman alikanavan lähtölämpötilan maksimi ennustetaan.

Kuvan 4.8 tulokset ovat ennustetarkkuuden tutkimisen kannalta kaikista tärkeimmät. Kuvatut ennusteet ovat kuumimman alikanavan lähtölämpötila, lineaaritehovara ja nipputehovara. Kuvissa on toteutuneet, teoreettiset sekä alaluvussa 3.3.1 kuvatun menetelmän avulla korjatut teoreettiset arvot. Korjausta varten lasketut teoreettisen ja sovitetun jakaumien erot on laskettu kymmenen edellisen tunnin (-10 ... 0 tuntia) keskiarvona.

Kuvan 4.8 (a) perusteella voidaan todeta, että kuumimman alikanavan lähtölämpötilan ennustus onnistui tässä tilanteessa tarkasti koko ennustusajalle. Alikanavan lähtölämpötilan maksimi kohdassa 5 tuntia ennustetaan teoreettisen jakauman perusteella noin 0,56 °C:n korkeammaksi toteutuneesta. Teoreettisen jakauman korjauksen jälkeen ero on enää alle 0,1 °C. Korjatun jakauman ero kuitenkin kasvaa kohdan 14 tuntia jälkeen, jolloin korjaamaton teoreettinen jakauma vastaa toteutunutta jopa hieman paremmin. Tämä johtuu siitä, että korjattulla jakaumalla pyritään huomioimaan paremmin epähomogeenisesti myrkyttynyt sydän, jolloin alikanavan lähtölämpötilan maksimi ennustetaan paremmin tehonnoston jälkeen. 14

tunnin päästä reaktorimyrkyt ovat jo tasaantuneet, jolloin jakaumien korjaus ei toimi enää yhtä hyvin.

Kuvan 4.8 (b) mukaan korjatun lineaaritehovaran minimiarvo kohdassa 7 tuntia ennustetaan vain noin 0,2 % alemmaksi kuin toteutunut minimiarvo. Toisaalta se ennustetaan tunti myöhemmäksi toteutuneesta. Vastaavasti kuin kuumimman alikanavan lähtölämpötilan tapauksessa, ennuste toimii toteutuneeseen nähden tarkemmin sydämen ollessa vielä epähomogeenisesti myrkyttynyt. Korjaus ei ole täydellinen, sillä se voidaan tehdä vain tehotiheyksiin.

Kuvasta 4.8 (c) huomataan, että nipputehon ennustaminen onnistui tässä tilanteessa hyvin. Korjattu nipputehovaran minimi ennustetaan kohtaan 7 tuntia ja noin 0,3 % suuremmaksi kuin toteutunut vara. Teoreettinen on taas toteutunutta noin 1,6 % suurempi eli korjauksen vaikutus on huomattava ja nähdään koko tilanteessa. Teoreettinen nipputehovara ei näyttäisi toimivan paremmin edes myrkkyjen tasaantuessa, vaan ero stabiloituu 2,5 %:iin. Tämä johtuu todennäköisesti syistä, joista tehojakauman sovitusta tehdään ylipäättään. Taulukkoon 4.1 on koottu ennustettujen parametrien arvot kohdista, joissa erot turvallisuusrajoihin on pienimmillään. Taulukossa on myös vertailtu ennustettujen arvojen eroja toteutuneisiin.

Taulukko 4.1. Yhteenvedo tarkkuuden vertailusta. Δ : ennustettu - toteutunut. * Ilmaisee ennustetun arvon muutosta kohti/poispäin toteutunutta arvoa korjauksen jälkeen: "+" ennustus paranee, "-" ennustus huononee.

		Toteutunut	Teoreettinen	Korjattu	$\Delta_{\text{Teor.}}$	$\Delta_{\text{Korj.}}$	Korj. vaikutus*
t_E	[h]	5	5	5	0	0	0
$T_{\text{in}}^{\text{ave}}$	[°C]	268,02	268,14	-	0,12	-	-
$G_{\text{in}}^{\text{ave}}$	[kg/s]	8477,81	8479,20	-	1,39	-	-
$\max_t T_{\text{sub}}^{\text{max}}$	[°C]	324,91	325,47	324,99	0,56	0,08	+0,48
t_E	[h]	6	7	7	1	1	0
$\min_t q_a^{\text{marg}}$	[%]	5,58	5,91	5,41	0,32	-0,17	+0,15
t_E	[h]	7	7	7	0	0	0
$\max_t P_a$	[MW]	6,67	6,56	6,65	-0,11	-0,02	+0,09
$\min_t P_a^{\text{marg}}$	[%]	1,87	3,48	2,15	1,61	0,29	+1,32

Taulukon 4.1 perusteella voidaan todeta, että kuumimman alikanavan lähtölämpötila, lineaaritehovara ja nipputehovara ovat ennustettavissa kriittisimmissä kohdissa riittävällä tarkkuudella. Marginaalien rajoitukset voidaan säätää käyttäjän toimesta esimerkiksi

käyttökokemuksen perusteella, mutta ensimmäisillä ennustuskerroilla niiden on oltava riittävän suuret. Myös reaktiivisuuden vaikuttavat jäähdytteen tulolämpötila ja bruttomassavirtaus sydämeen voidaan ennustaa tehon ja RA-paineen funktiona riittävän tarkasti. Tuloksien perusteella todetaan, että työkalu täyttää asetetun tavoitteen tarkkuuden suhteen.

4.4.2 Optimaalinen reaktiivisuuden säätö

Tässä alaluvussa kuvataan ReactranHelp:n arvioima ennuste kokonaisuudessaan validointitapaukselle. Toisin kuin edellisessä alaluvussa, reaktorin termisestä tehosta, säätävän ryhmän asennosta, RA-paineesta ja booripitoisuudesta ei tiedetä mitään ennustusajankohdan jälkeen. Ennen sitä kuitenkin kuvataan, millä valinnoilla ja oletuksilla tulokset on tuotettu.

Ennen ennustusajankohtaa (9.7.2020 klo 11.00) tietokantaa päivitetään ensin yhden tunnin pituisilla mittauksilla, mutta viimeinen tunti päivitetään 5 minuutin pituisilla mittausarvoilla. Siten ennustuksen lähtökohta saadaan vastaamaan paremmin hetkellisarvoja.

Tilanne on jakson loppupuolella, joten reaktiivisuuden säätö toteutetaan seuraavassa prioriteettijärjestyksessä: säätävän ryhmän asento, RA-paine, booripitoisuus ja terminen teho. Booripitoisuuden säätö on prioriteettijärjestyksessä viimeisenä säätömekanismina ennen tehon muuttamista, joten sen käyttöä pyritään minimoimaan. Jos tilanne olisi tapahtunut jakson alkupuolella, booripitoisuuden säätö olisi voinut olla prioriteettijärjestyksessä ennen RA-painetta. Säätövaran loppuessa viimeinen vaihtoehto on termisen tehon laskeminen suunnitellusta arvosta. Tällaiseen tilanteeseen päädyttäisiin, jos kompensoitavan reaktiivisuuden muutos tapahtuisi liian nopeasti booripitoisuuden hallintajärjestelmälle.

Taulukossa 4.2 näkyvät ReactranHelp:lle syötetyt tavoitearvot ja rajat reaktiivisuuden säädölle. Säätävän ryhmän ylin raja on mekaaninen yläraja ja alaraja TTKE:n asentorajoitus. Alimpaan rajaan vaikuttaa myös lineaaritehovara luvussa 3.3.2 kuvatulla tavalla. Säätävän ryhmän alimpaan rajaan puututaan, jos lineaaritehovara alittaa 1 %:n. Säätävän ryhmän maksimisäätönopeus on 20 mm/s, mutta käytännössä se on niin nopea, ettei sitä voi huomioida tunnin pituisissa aika-askelissa.

RA-paineen tavoitearvo asetetaan samaksi kuin mittauksien viimeinen arvo eli arvoon 46,5 bar. Tällä valinnalla on vaikutusta vain säätävän ryhmän alun asentoon, sillä RA-painetta

muutetaan kriittisyyden haussa joka tapauksessa. RA-paineen yläraja on asetettu arvoon 47 bar, koska sen arvon ylittäessä turbiinin ohitus laukeaa. Paineen ylärajaan vaikuttaa myös kuumimman alikanavan lähtölämpötila luvussa 3.3.2 kuvatulla tavalla. Sen maksimiarvoksi on asetettu hälytysraja 324,5 °C, jotta ylimpään sallittuun rajaan on vielä puolen asteen marginaali. Näin ollen RA-paineelle jää hieman säätövaraa ylöspäin, jos esimerkiksi turbiinit vaativat sen hienosäätöä. RA-paineen alarajaksi asetetaan 43 bar. Rajasta on vielä 2 bar:n marginaali paineeseen 41 bar, jossa turbiinin tehoa joudutaan laskemaan. Lisäksi alhaisilla paineilla turbiinin hyötysuhde alenee sekä kosteus lisääntyy merkittävästi viimeisissä turbiinin vaiheissa.

Booripitoisuuden alarajaksi on asetettu 0 ppm ja ylärajaksi TTKE:n mukainen yläraja. Tuotettu energia ennen transienttia oli noin 285 FPD, joten sallittu suurin booripitoisuus on 1200 ppm (Fortum Power and Heat Oy, 2015a ss. 3.3.2.2-5). Booripitoisuuden suurin muutosnopeus lasketaan booraus- ja laimennusfunktiolla. Boorauksessa syötettävän boorihapon pitoisuus on 40 g/kg ja syöttövirtauksen suuruus vastaa maksimissaan yhtä suurkapasiteettista pumppua eli 18 kg/s. Kuvan 2.4 mukaan laimentaessa voidaan käyttää puhdasta vettä tässä vaiheessa jaksoa (energialla 285 FPD). Suurin syöttövirtaus on vastaavasti yhden suurkapasiteettisen pumpun verran. Tavoitearvoksi asetetaan edellisen aika-askelen arvo, jolloin booripitoisuuden muutos minimoidaan tällä valinnalla.

Termisen tehon suurin arvo on nimellisteho ja pienin arvo nollateho. Teho muuttuu ajan funktiona TTKE:n mukaisesti suurimman sallitun tehon nostonopeuden mukaan, kuten luvussa 3.3 kuvattiin. Tässä tapauksessa tehonrajoitustilanne oli noin yhdeksän tunnin pituinen, joten TTKE:n mukaan 90 ± 2 %:n tehotasolta saa nousta nopeimmillaan gradientilla 60 MWe/h nimellisteholle (Fortum Power and Heat Oy, 2015a ss. 3.3.2.1-4). Laitoksen hyötysuhteena käytetään vakiota 35 %. Jos tehoa joudutaan muuttamaan reaktiivisuuden kompensoimiseksi, uusi iteroitu teho ei saa olla maksimigradientin avulla laskettua tehoa korkeampi.

Taulukko 4.2. ReactranHelp:lle syötetyt tavoitearvot, rajat (maksimiarvo ja minimiarvo) sekä maksimigradientit. * Rajoitus ilmoitettu asteina marginaalin rajoituksen sijaan selvyuden vuoksi.

	Maksimiarvo	Minimiarvo	Tavoitearvo	Maksimigradientti
H_6	2500 mm	TTKE	2500 mm	∞
p_{RA}	47 bar	43 bar	46,5 bar	∞
C_B	TTKE	0 ppm	$C_{B,i-1}$	$C_B \uparrow$: 40 g/kg, 18 kg/s $C_B \downarrow$: 0 g/kg, 18 kg/s
P_{th}	1500 MW	0 MW	-	TTKE
T_{sub}^{max*}	324.5 °C	-	-	∞
q_a^{marg}	-	1 %	-	∞
p_a^{marg}	-	1 %	-	∞

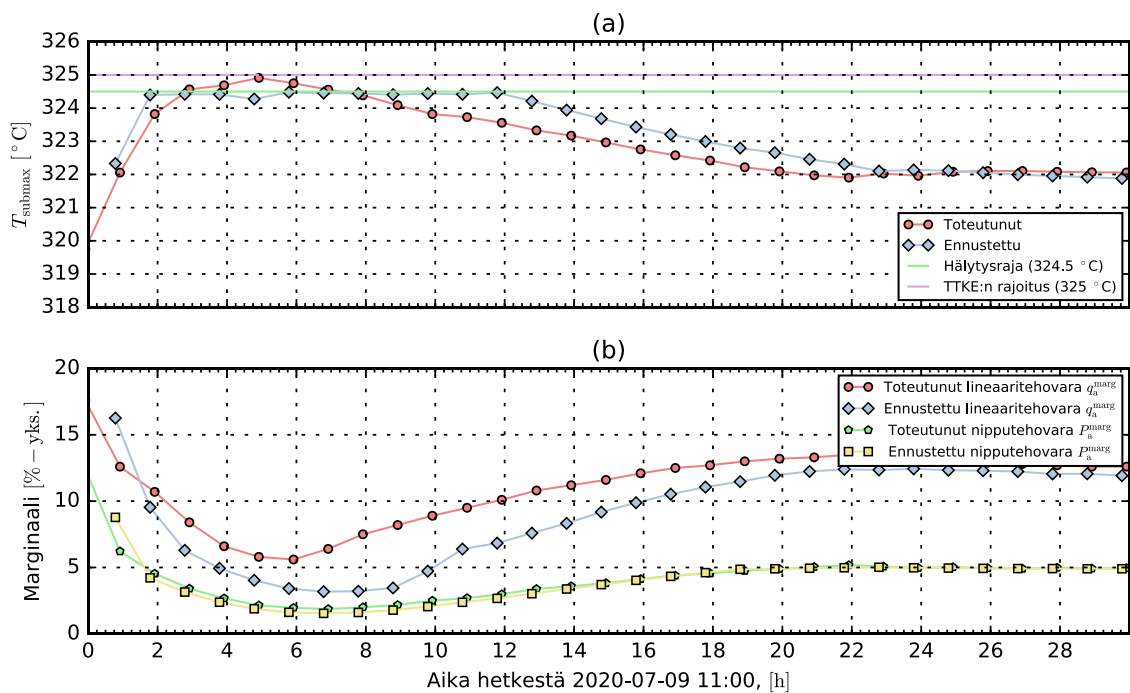
Kuvassa 4.9 näkyy kuumimman alikanavan lähtölämpötilan, lineaaritehovaran ja nipputehovaran ennustus transientin aikana. Kuvassa 4.10 on tuloksena saatu ennuste ja toteutuneet arvot tehonnostosta sekä reaktiivisuuden säädöstä.

Kuvan 4.10 (a) mukaan ennustettu terminen teho nousee hieman hitaammin toteutuneesta aikavälillä 0 ... 2 tuntia. Ero johtuu todennäköisesti vakion kokonaishyötysuhteen oletuksesta. Terminen teho vaikuttaa termisiin marginaaleihin ja reaktiivisuuden säätöön, joten niiden tarkkuus huononee tämän eron seurauksena. Alemmilla termisillä tehoilla ennuste ei ole kuitenkaan yhtä kriittinen verrattuna kohtaan, johon ksenonaliheilahduksesta seuraava paikallinen tehuippu ennustetaan nimellisteholla. Tehonnoston loppupuolella terminen teho kuitenkin nousee nimellisarvoonsa hidastelematta toisin kuin toteutunut teho, sillä ReactranHelp osoittaa termisten marginaalien pysyvän riittävän suurina. Termistä tehoa on todennäköisesti pidetty hieman alempana, jotta termisissä marginaaleissa olisi enemmän varaa. Muutaman megawatin rajoitus termisestä tehosta kasvattaa marginaaleja merkittävästi.

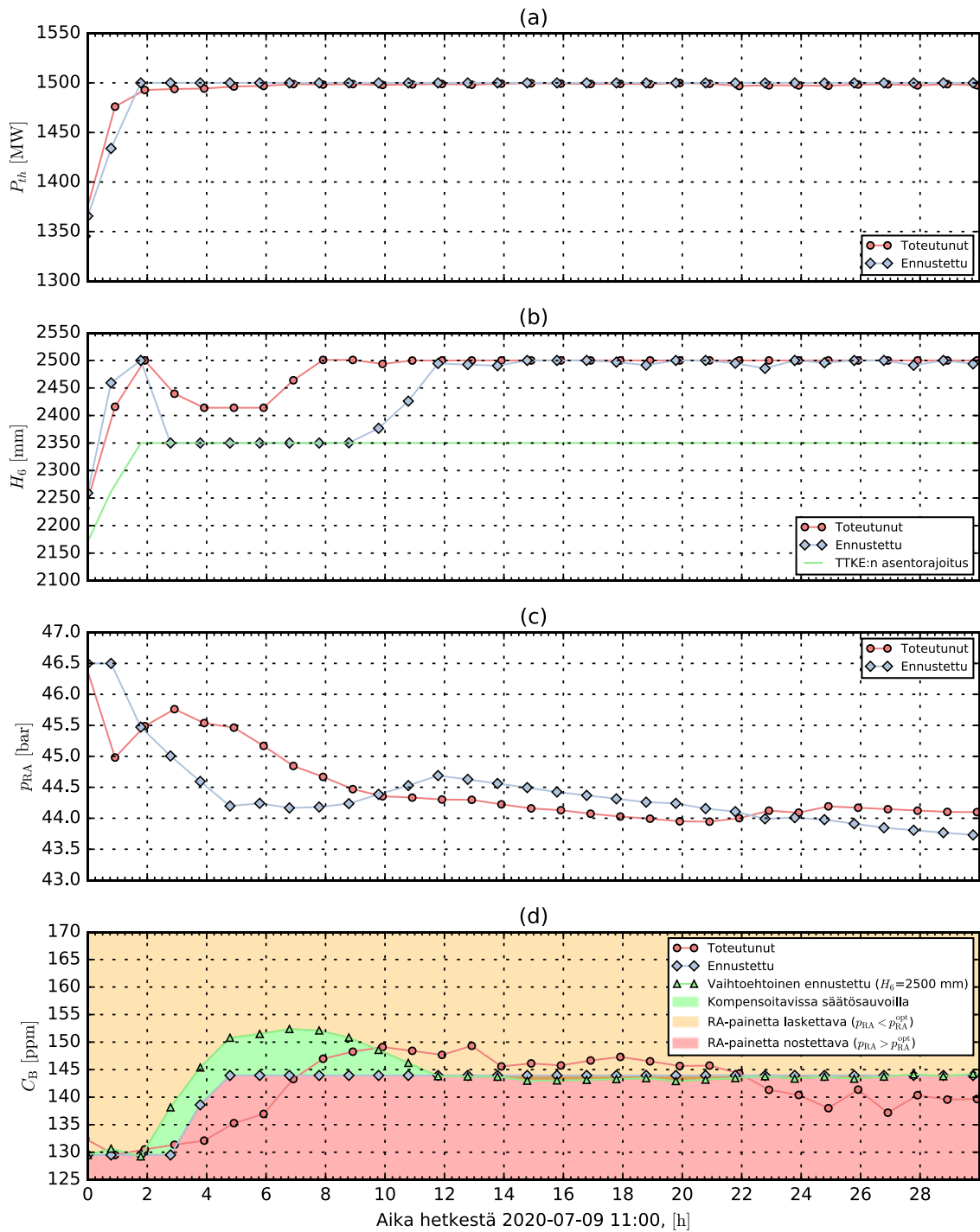
Kuvasta 4.10 nähdään, että ReactranHelp käyttää ensin säätävää ryhmää tehon nostamiseen, sillä RA-paine ja booripitoisuus pysyvät vakiona. Tehon saavuttaessa nimellisen arvon säätävä ryhmä lasketaan TTKE:n alarajalle ksenonpitoisuuden pienentymisen kompensoimiseksi. Hetkessä 2 tuntia RA-painetta lasketaan kuumimman alikanavan lähtölämpötilan rajoittamiseksi. Samalla periaatteella RA-paine laskee arvoon 44,2 bar asti (hetkessä 7 tuntia) ja kuumimman alikanavan lähtölämpötila pysyttelee asetetulla rajalla. Booripitoisuutta lisätään hieman ennen kohtaa 3 tuntia, sillä säätävässä ryhmässä ei ole säätövaraa alaspäin,

eikä RA-painetta voida nostaa ylöspäin kuumimman alikanavan lähtölämpötilan rajoituksen takia. Booripitoisuus jää ennustuksen loppuajaksi arvoon 144 ppm. Lopuksi säätävä ryhmä nostetaan ylärajalle kohdasta 9 tuntia alkaen.

Kuvasta 4.9 nähdään nipputeholla ja lineaariteholla olevan riittävästi varaa koko tilanteessa, joten esimerkiksi säätävän ryhmän asentoon ei puututtu. Lineaaritehovara on kuitenkin toteutunutta alempi, koska säätävä ryhmä oli alemmassa asennossa aikavälillä 2 ... 12 tuntia. Reaktiivisuuden säätö ei vaikuta merkittävästi nipputehoon, joten se ennustetaan lähes samaksi toteutuneen kanssa.



Kuva 4.9. Ennustetut ja toteutuneet (a) kuumimman alikanavan lähtölämpötilat, (b) lineaaritehovarot ja nipputehovarot.



Kuva 4.10. (a) Toteutunut ja ennustettu terminen teho. (b) Säätvän ryhmän toteutunut asento, TTKE:n mukainen asentorajoitus sekä ennustettu asento. (c) Toteutunut ja ennustettu RA-paine. (d) Toteutunut ja ennustettu booripitoisuus. Pieni tasoero booripitoisuuksien välillä kohdassa 0 tuntia johtuu keskiarvoistetusta erosta mitatun ja kriittisen boorin välillä.

Ennustus voisi olla vielä parempi kahdessa asiassa. Säättävää ryhmää ei ole suotavaa käyttää booripitoisuuden minimointiin, vaan sen voisi pitää yläasennossa. Näin voisi pienentää riskiä myrkyttää sydän epähomogeenisesti. Näin ollen booripitoisuuden ennusteeseen on kuvattu myös booripitoisuus tilanteessa, jossa säättävä ryhmä jätettäisiin yläasentoon. Samaan kuvaan on myös havainnollistettu booripitoisuuden alue, joka on kompensoitavissa säätösauvoilla ja alueet, joissa RA-painetta pitäisi muuttaa.

Toinen ennusteen kehitettävä ominaisuus on myöhäinen laimennuksen aloittaminen. Se johtuu prioriteettijärjestyksestä, koska lisääntyvää ksenonpitoisuutta kompensoidaan ensin RA-painetta laskemalla hetkestä 12 tuntia eteenpäin. Jos ennustusta jatkettaisiin hetkestä 30 tuntia eteenpäin, RA-painetta laskettaisiin arvoon 43 bar asti. Vasta sen jälkeen alkaisi booripitoisuuden alentaminen. Tämä voidaan korjata esimerkiksi lukitsemalla RA-paine hetkessä 14 tuntia paikoilleen, jolloin booripitoisuutta täytyisi muuttaa tästä hetkestä eteenpäin.

Ennustettu reaktiivisuuden säätö on kuitenkin paljon optimaalisempi verrattuna toteutuneeseen säätöön. Kohdassa 3 tuntia eteenpäin ReactranHelp ehdottaa noin 0,75 - 1 bar:n matalampaa RA-painetta, jonka ansiosta kuumimman alikanavan lähtölämpötilaan jää enemmän varaa. Termisen tehon nostaminen on optimaalisempi siinä mielessä, että se nostetaan nopeammin nimelliseen arvoonsa. ReactranHelp:llä voidaan siis arvioida, onko nimellistehoon nouseminen heti mahdollista marginaalien puitteissa.

Tuloksista vedetään johtopäätös, että ReactranHelp kykenee arvioimaan reaktiivisuuden säädön tilanteelle. Tämä ennustus olisi ehkäissyt tilanteessa tapahtuneen riskitilanteen kuumimman alikanavan lähtölämpötilan suhteen. Lisäksi energiantuotanto olisi voitu maksimoida kohdasta 2 tuntia eteenpäin. Toteutuneen tehon perusteella myyntiin menevää sähköenergiaa jäi tuottamatta noin 10 MWh.

Ennustuksessa saadaan osalle parametreista efektiivisiä keskiarvoja, joten todelliset arvot voivat olla vaikeasti tulkittavissa. Ongelma voidaan ratkaista käyttämällä pienempää aikaaskelta, jolloin tulokset kuvaavat paremmin hetkellisarvoja.

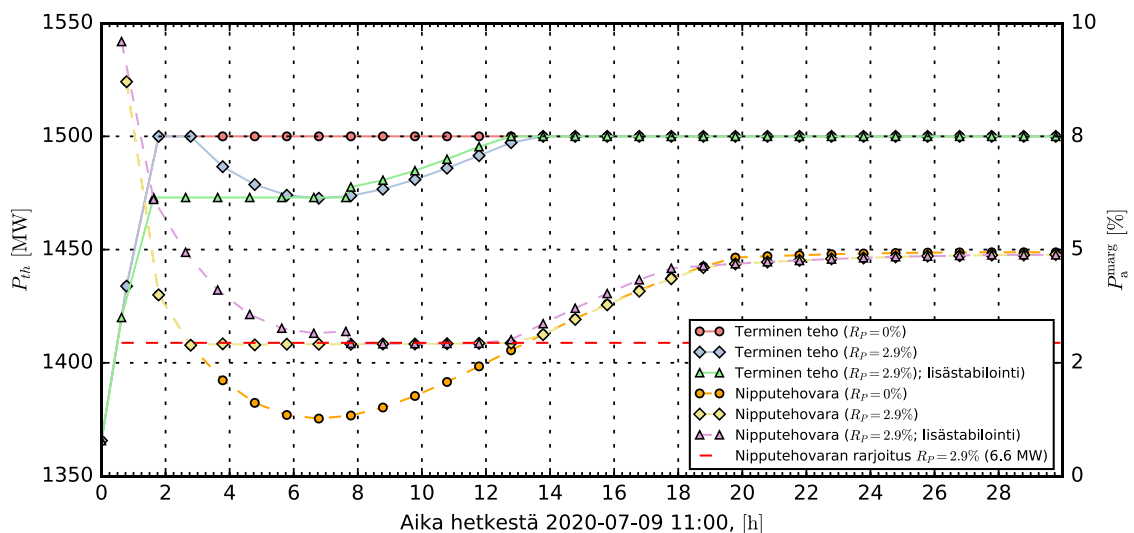
4.4.3 Sydämen lisästabilointi

Tässä alaluvussa todistetaan, että ReactranHelp:n avulla voidaan arvioida myös sydämen lisästabilointi tarvittaessa. Nipputehovaran minimiarvo asetetaan 2,9 %:iin (maksimiteho 6,6

MW). Muut valinnat ja oletukset ovat samat kuin alaluvussa 4.4.2. Näin ollen Reactran-Help:n on laskettava reaktorin termistä tehoa varan lisäämiseksi noin 2 %:n verran.

Kuvassa 4.11 nähdään reaktorin termiset tehot ja nipputehovarajat eri tilanteille. Alkuperäisen rajoituksen mukainen tehonnosto ja nipputehovara laskeutuu noin 1 %:iin ja terminen teho pysyy nimellisessä arvossa. Kun rajoitusta kiristetään, terminen teho nostetaan ensin nimelliseen arvoon, mutta kohdassa 3 tuntia nipputehovaran rajoitus tulee vastaan ja termistä tehoa joudutaan laskemaan aina 1473 MW asti. Ksenonpitoisuuksien tasoittuessa tehoa voidaan taas nostaa kohti nimellistä arvoa, joka saavutetaan kohdassa 13 tuntia.

Aliluvun 3.3 vuokaaviolla 3.3 kysytään seuraavasti: tehonnosto optimaalinen? Tuloksen perusteella voidaan todeta tehonnoston olevan epäoptimaalinen, joten siirrytään lisästabiloituvaiheeseen. Terminen teho asetetaan 1473 MW stabilointitehoon seitsemäksi tunniksi. Näin ollen termistä tehoa ei turhaan nosteta nimelliseen arvoon hetkellisesti. Kriittisyyden haku suoritetaan uudestaan, minkä tuloksena saadaan lopullinen optimaalisempi tehonnosto. Terminen teho nousee stabilointitehosta melkein samalla nopeudella nimelliseen arvoon kuin ensimmäisessä kriittisyyden haussa. Nipputehovara pysyttelee rajoituksessa, kunnes terminen teho asettuu nimelliseen arvoon.



Kuva 4.11. Terminen teho ja nipputehovara stabiloimattomalle ja stabiloidulle reaktorille. Kuvan on merkitty myös alkuperäisen rajoituksen mukainen tilanne.

Tehon rajoittumisesta johtuva termisen energiantuotannon menetys on noin 270 MWh. Myyntiin menevänä sähköinä vastaava energiamäärä on noin 90 MWh. Jos sähkön hinta

oletettaisiin noin 40 euroksi megawattituntia kohden, niin menetetty rahamäärä olisi noin 3600 euroa. Tämä on pieni hinta verrattuna esimerkiksi polttoainevauriosta aiheutuviin kuluihin. Tuloksista vedetään johtopäätös, että ReactranHelp kykenee arvioimaan lisästabiloinnin vaatimuksen mukaisesti.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä diplomityössä kehitetty reaktiivisuuden hallintatyökalu ReactranHelp täyttää sille asetetut vaatimukset, jotka esiteltiin alaluvussa 1.2. Ensimmäinen alaluvussa esitetty vaatimus täytettiin kehittämällä analyysifunktio, joka käyttää RESU-98 Offline-versiota suoritusarvolaskennan toistamiseen mittausarvojen perusteella. Offline-versio toimii RML-nauhojen avulla, joten mittausarvojen syöttämiseen ja tuloksien tallentamiseen kehitettiin oma rutiini. Funktio validoitiin alaluvussa 4.2 vertaamalla funktiolla tuotettuja tuloksia Loviisan ydinvoimalaitoksella tapahtuvan suoritusarvolaskennan (RESU-98 Online) tuloksiin. Validointitapauksena käytettiin heinäkuussa 2020 LO1:llä tapahtunutta käyttöhäiriötä, jossa yksi säätösauva tippui ja jäi pohjaan yhdeksäksi tunniksi. Tapaus kuvasi hyvin, millainen riskitilanne TTKE-rajojen ylittämiseen tehonnoston aikana voi aiheutua epähomogeenisestä sydämen myrkyttymisestä. Funktion todettiin tuottavan validointitapauksen laskennalliset suureet riittävällä tarkkuudella. Esimerkiksi kriittinen booripitoisuus, joka kuvaa hyvin diffuusioyhtälöiden ratkaisua, todettiin enimmillään 1,2 ppm päähän toteutuneesta. Pienet erot tuloksien välillä todettiin johtuvan RML-nauhojen rajoitteesta desimaalien määrille sekä RESU-98 Online ja Offline -versioiden välisistä eroista nippujen sisäisten muotokertoimien päivitysfrekvenssien suhteen.

Toisen vaatimuksen täyttämiseksi Excel-pohjainen boorauksen ja laimennuksen dynamiikan kuvaava työkalu täytyi kääntää Python3 -versioksi. Näin ollen ReactranHelp voi käyttää sitä reaktiivisuuden säädön arvioimisessa hyödyksi. Uusi versio todettiin toimivan identtisesti Excel-työkalun kanssa ja ero (enintään $-7 \cdot 10^{-12}$ % verifiointitapauksessa) voidaan selittää Excel:n käyttämästä maksimimäärästä desimaaleja. Työkalun pohjalla olevat differentiaaliyhtälöt ratkaistaan eksplisiittisellä menetelmällä, jonka askelpituutena käytetään kahta minuuttia. Uuteen funktioon se asetetaan yhteen sekuntiin, sillä herkkyysanalyysin tuloksena valinnan todettiin parantavan tarkkuutta hieman.

Kolme seuraavaa alaluvussa 1.2 asetettua vaatimusta täytettiin kehittämällä ennustusfunktio, joka validoitiin kolmessa osassa alaluvussa 4.4. Ensimmäisessä osassa todistettiin riittävä ennustetarkkuus validointitapauksen aikaisista termisistä marginaaleista. Termisestä tehosta ja reaktiivisuuden säädöstä käytettiin toteutuneita arvoja paremman vertailun vuoksi. Lähelämpötilan maksimi transientin aikana ennustettiin 0,08 °C:n päähän toteutuneesta. Lineaaritehovaran ja nipputehovaran minimien erot ennustettiin 0,17 %-yksikön ja 0,29 %-

yksikön päähän toteutuneista arvoista. Tuloksia paransi merkittävästi menetelmä, jossa historiasta saatujen sovitettujen ja teoreettisten jakaumien eroja voidaan käyttää ennusteen jakaumien tarkentamiseen. Termiset marginaalit ennustettiin toteutuneiden kanssa riittävän samanlaisiksi, jotta niille voidaan asettaa kohtuullisen pienet varmuuskertoimet. Niiden tarkemmaksi määrittämiseksi tarvitaan kuitenkin vielä lisää käyttökokemusta ohjelmasta, jotta voidaan todeta ennusteen suurin mahdollinen epäkonservatiivinen virhe.

Toisessa osassa validointia todistettiin, että ennustusfunktiolla voidaan arvioida tehonnosto ja optimaalisempi reaktiivisuuden säätö verrattuna validointitapauksen toteutuneeseen säätöön. Termisen tehon arviointiin ajan suhteen kehitettiin menetelmä, joka hyödyntää TTKE tehon nostonopeuden rajoituksia. Validoinnissa käytettiin kuitenkin vakiota kokonaishyötysuhdetta generaattoritehon muuttamiseksi termiseksi tehoksi, jonka seurauksena tehonnosto ei vastannut täysin toteutunutta. Reaktiivisuuden säätömekanismien asentojen hakemiseksi kehitettiin kriittisyyden hakurutiini, joka perustuu käyttäjän antamiin rajoituksiin ja prioriteettijärjestykseen. Ylemmän prioriteetin säätömekanismin vara käytetään loppuun ennen alemman prioriteetin mekanismeja. Lisäksi säätö toteutetaan siten, ettei termiset marginaalit alita käyttäjän antamia minimiarvoja. Viimeinen vaihtoehto on laskea termistä tehoa, jolloin termiset marginaalit kasvavat.

Validointitapauksen toteutunut kuumimman alikanavan lähtölämpötila nousi arvoon 324,9 °C tehonnoston jälkeen. Turvallisuusraja on 325 °C, joten marginaalia jäi vain 0,1 °C. Alikanavan lähtölämpötilan nousu miltei TTKE-rajalle olisi voitu välttää käyttämällä hieman alemmaa RA-painetta, jolloin tulolämpötila sydämeen olisi ollut alempi. Ennusteessa kuumimman alikanavan lähtölämpötilan maksimiarvoksi asetettiin 324,5 °C, joten tuloksena saatiin toteutunutta alempi RA-paine. Näin ollen ennustettu reaktiivisuuden säätö voidaan katsoa toteutunutta optimaalisemmaksi, sillä ennusteen avulla tehonnosto olisi voitu suorittaa riittävän suurilla termisillä marginaaleilla.

Kriittisyyden haussa viimeinen vaihtoehto kasvattaa marginaaleja on termisen tehon laskeminen. Toisaalta haussa ei ole dynaamista optimointia, joten haun tuloksena saatu tehonnosto voi olla epäoptimaalinen. Tehonnosto täytyy siis suunnitella uudestaan käyttäjän toimesta, mutta hyödyntämällä haun tuloksia. Validoinnissa todettiin, että tehonnoston optimoiminen onnistuu käyttäjän avustamana. Nipputehon suurin sallittu arvo asetettiin arvoon 6,6 MW, joten ReactranHelp:n täytyi laskea termistä tehoa nimellisestä tilasta marginaalin

kasvattamiseksi. Tästä johtuen kriittisyyden hakeminen täytyi suorittaa uudestaan. Tuloksien perusteella reaktorin teho asetettiin arvoon 1473 MW noin seitsemäksi tunniksi, jolloin tehonnosto nimelliseen arvoon iteroitui optimaaliseksi toisessa kriittisyyden haussa.

ReactranHelp todettiin toimivan riittävän nopeasti reaktorifysiikkaryhmän käyttämällä palvelimella, mutta työkalu tullaan asentamaan PTK:lle palvelinuudistuksen jälkeen. Näin ollen laskunopeus tulee todennäköisesti vielä kasvamaan. Toinen vaihtoehto nopeuttaa ennustamista on luoda lyhyempiä ennustuksia, mutta useampia. Työkalulle tullaan mahdollisesti vielä kehittämään graafinen käyttöliittymä, jolla vastataan vaatimukseen helppokäyttöisyydestä ja selkeydestä.

ReactranHelp:ssä on kehitettäviä kohteita, jotka tullaan vielä todennäköisesti toteuttamaan. Tärkein kohde on parempi reaktoriyksiköiden kokonaishyötysuhteen korrelaatio generaattoritehon tulkitsemiseksi termiseksi tehoksi. Termisten tehon arvioiminen ei validoinnissa vastannut täysin todellista, sillä hyötysuhteesta käytettiin vakiota arvoa. Se huonontaa esimerkiksi säätösauvojen säätävän ryhmän asennon tarkkuutta. Toinen kehitettävä kohde on booraus- ja laimennusjärjestelmän tarkkuuden parantaminen. Se saattaisi vaatia fysikaalisen mallin laajentamista, jotta boorihapon sekoittuminen eri osissa järjestelmää voidaan huomioida paremmin.

6 YHTEENVETO

Tässä diplomityössä kehitettiin ja validoitiin uusi Python3-ohjelmointikielellä ohjelmoitu työkalu ReactranHelp reaktiivisuustransienttien hallintaan. Kehityksen tavoitteena oli Loviisan ydinvoimalaitoksen käyttöorganisaation ja reaktorifysiikkaryhmän toivomukset ja odotukset. Ne ovat peräisin nykyisen työkalun puutteista, jotka voidaan selittää työkalun fyysikaalisen mallin yksinkertaisuudella. Epähomogeenistä myrkyttymistä ei voida mallintaa, eikä termisten marginaalien kehittymistä ennustaa.

Reaktiivisuustransientin aikana reaktiivisuus on muutostilassa, joten sitä pitää kompensoida eri säätömekanismilla. VVER-440-reaktoreissa reaktiivisuutta voidaan hallita säätösauvojen säätävällä ryhmällä sekä jäähdytteen tulolämpötilaa (RA-paineella) ja booripitoisuutta muuttamalla. Lisäksi termisten marginaalien ylityksiä voi tapahtua tehonnoston yhteydessä, mikäli sydän on esimerkiksi epähomogeenisesti myrkyttynyt. ReactranHelp ennustaa optimaalisen reaktiivisuuden säädön kriittisyyden haulla ja huomioi termiset marginaalit samalla. Viimeisenä vaihtoehtona se laskee termistä tehoa marginaalien kasvattamiseksi. Pohjana toimii RESU-98, jota käytetään Loviisan ydinvoimalaitoksella termisten marginaalien valvontaan. Se simuloi reaktorisydämen teoreettisesti, mutta hyödyntää VVER-440:n mitausinstrumentointia tuloksien tarkentamiseen. Reaktorifysiikka on siis tarkasti mallinnettu, joten se sopii ennustamiseen mainiosti.

Validoinnissa pyritään vastaamaan käyttäjien vaatimuksiin ja verifiointissa spesifikaatioon. Validointi toteutettiin testitapauksella, joka oli Loviisa-1:n käyttöhäiriötapahtuma heinäkuulta 2020. Säätösauva tippui pohjaan yhdeksäksi tunniksi, joka sai sydämen myrkyttymään epähomogeenisesti. ReactranHelp:n funktiot validoitiin ja verifioitiin onnistuneesti: Testitapauksen laskennalliset suureet onnistuttiin laskemaan uudelleen erittäin hyvällä tarkkuudella. Reaktiivisuuden säätö oli testitapausta optimaalisempi, termiset marginaalit ennustettiin tarkasti ja lisästabiloinnin arvioiminen onnistui ongelmitta. Lisäksi uusi boorauksen ja laimennuksen dynamiikan kuvaava funktio todettiin toimivan identtisesti nykyisen Excel-työkalun kanssa. ReactranHelp todettiin toimivan riittävän nopeasti, mutta vaatimukset helpokäyttöisyydestä ja selkeydestä pyritään mahdollisesti täyttämään kehittämällä graafinen käyttöliittymä.

7 LÄHDELUETTELO

Arjoranta, J., 2016. LO1 täysin vähävuotoinen 4-erätasapainolataus TVEL:n 4,4 % sekoitusvälihilallisella Gd-polttoaineella, N. polttoainelatauksen reaktorifysikaaliset ominaisuudet, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Brik, A., Bibilashvily, Y., Bogatyr, S. & Medvedev, A., 1998. Local linear heat ramps in the VVER-440 transient regimes, Moscow: Kurchatov Institute.

Diamond, D., Bromley, B. & Aronson, A., 2002. Studies of the Rod Ejection Accident in a PWR, New York: Energy Sciences & Technology Department, Brookhaven National Laboratory.

Fortum Power and Heat Oy, 1999. RESU-98 spesifikaatio, LO1&2 Reaktorin suoritusarvolaskennan yleiskuvaus, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Fortum Power and Heat Oy, 2015a. LO1 Turvallisuustekniset käyttöehdot (TTKE), Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Fortum Power and Heat Oy, 2015b. RESU-98 spesifikaatio, Aliohjelma ELSICA. Nipun sisäisen tehojakautuman ja nipun efektiivisen virtausjakautuman määrittäminen RESU-98:ssa, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Fortum Power and Heat Oy, 2015c. RESU-98 spesifikaatio, Aliohjelma RADFIT, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Fortum Power and Heat Oy, 2015d. RESU-98 spesifikaatio, Mittaustiedon keräily, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Fortum Power and Heat Oy, 2015e. RESU-98 spesifikaatio, Vuo- ja tehojakauman sovitus mittauksiin, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Fortum Power and Heat Oy, 2017a. FSAR 4.2 Polttoaine, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Fortum Power and Heat Oy, 2017b. LO2 Turvallisuustekniset käyttöehdot (TTKE), Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Fortum Power and Heat Oy, 2019a. FSAR 04.6 Reaktiivisuuden hallintajärjestelmät, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Fortum Power and Heat Oy, 2019b. FSAR 7.3.1 Reaktorin ehkäisevä suojausjärjestelmä (PPS), Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Fortum Power and Heat Oy, 2019c. FSAR 7.6.1 Ydintekninen instrumentointi, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Fortum Power and Heat Oy, 2020a. FSAR 1.2 Loviisan voimalaitoksen yleiskuvaus, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Fortum Power and Heat Oy, 2020b. FSAR 14.0 Yleistä turvallisuusanalyysistä, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Fortum Power and Heat Oy, 2020c. FSAR 4.3 Ydintekninen suunnittelu, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Fortum Power and Heat Oy, 2020d. FSAR 4.4 Lämpö- ja virtaustekninen suunnittelu, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Fortum Power and Heat Oy, 2020e. RESU-98 spesifikaatio, Ksenonin kuvaus RESU-98:ssa, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Fortum Power and Heat Oy, 2021. RESU-98 spesifikaatio, RESU-98 tietokanta ja sen ylläpito, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Gagarinskiy, A. A. ym., 2013. VVER-440 Fuel cycle improvement: status and prospects. Atomic Energy, Issue 114, pp. 94-101.

Hyvönen, O., 2021. DUAP-projekti, Polttoainien CASMO-4E -ohjelmalle syötettävien materiaali- ja geometriatietojen päivitys, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

IAEA, 1994. Design basis and design features of WWER-440 model 213 nuclear power plant, Vienna: International Atomic Energy Agency.

IAEA, 2005. Design of the Reactor Core for Nuclear Power Plants, Safety Guide, Austria: International Nuclear Energy Agency.

IEEE, 2017. Standard for System, Software, and Hardware Verification and Validation. IEEE Std 1012-2016 toim. New York: IEEE Computer Society.

Kaloinen, E., 1992. HEXBU-3D/MOD5, A new version of the HEXBU-3D code, Espoo: VTT.

Kaloinen, E. & Höglund, R., 1986. HEXBU-XE, a modified version of the HEXUBU-3D program for analysis of xenon oscillation, Espoo: VTT.

Kaloinen, E., Teräsvirta, R. & Siltanen, P., 1981. HEXBU-3D, a three dimensional PWR-simulator program of hexagonal fuel assemblies. ISBN 951-38-1254-5 toim. Espoo: VTT/IVO.

Kuopanportti, J., 2016. CFD-analyysiin perustuvan reaktorin tulolämpötilasovituksen testaaminen, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Kuopanportti, J., 2017a. Apros cross section data, Content and creation, diaesitys, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Kuopanportti, J., 2017b. Lataussuunnittelussa käytettävä nettovirtaus ja tulolämpötila, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Kuopanportti, J., 2019. Lataussuunnittelussa ja online-valvonnassa käytettävät vaikutusalat ja reunaehdot, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Kuusisto, J., 1997. ELSI 1440, A two dimensional pinpower program for hexagonal fuel assemblies, Espoo: IVO Power engineering Ltd.

Kuusisto, J., 2002. RESU98, SPND-tulkintamalli, Espoo: Fortum Nuclear Services Oy.

Kuusisto, J., 2007. Integrated program package HEXBU-ELSI for VVER fuel management calculations, Espoo: IVO Power engineering Ltd.

- Kyrki-Rajamäki, R., 2014. Kevytvesireaktoreiden säätö, nopeat reaktorit ja RBMK, Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Ydinvoimatekniikan laboratorio.
- Kyrki-Rajamäki, R., 2014. Reaktorimateriaalit ja yleisimmät reaktorityypit, Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Ydinvoimatekniikan laboratorio.
- Lamarsh, J. & Baratta, A., 2013. Introduction to nuclear engineering. Kolmas painos toim. Harlow: Person Education Limited.
- Lehtinen, H. ym., 2020. Käyttötapaturmaraportti, 2-Ryhmän yksi säätösauva putosi alas, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.
- Oka, Y., 2014. Nuclear Reactor Design. Ensimmäinen painos toim. Tokyo: Springer Japan.
- Oka, Y. & Suzuki, K., 2013. Nuclear Reactor Kinetics and Plant Control. Ensimmäinen painos toim. Tokyo: Springer Japan.
- Peltonen, J., 1996. High and second order polynomial feedback models for VVER-440 fuel two-group cross sections, Espoo: VTT.
- Piessens, R., Doncker-Kapenga, E., Uberhuber, C. & Kahaner, D., 1983. Quadpack. Ensimmäinen painos toim. s.l.:Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Reuss, P., 2008. Neutron physics. Ensimmäinen painos toim. Pariisi: Les Ulis France : EDP Sciences.
- Siltanen, P., Anttila, M. & Teräsvirta, R., 1974. HEXBU, two-dimensional core power distribution, burnup and fuel management code for hexagonal fuel assemblies, Espoo: VTT, IVO.
- STUK, 2014. European stress tests for nuclear power plants national action plan Finland, Helsinki: STUK.
- Taipale, H., 2009. Jatkuvatoiniset booripitoisuuden mittaukset TK-linjoihin, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

The SciPy community, 2021. SciPy.org. [Online]
Saataavissa: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.integrate.quad.html>
[Haettu 18 5 2021].

Vainio, P. & Taberman, T., 2020. RA Päähöyryjärjestelmä, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

Wang, R., 2015. Fourier.eng, Golden-section method. [Online]
Saataavissa: <http://fourier.eng.hmc.edu/e176/lectures/NM/node24.html>
[Haettu 14 4 2021].

Wang, R., 2015. Fourier.eng, Parabolic Interpolation. [Online]
Saataavissa: <http://fourier.eng.hmc.edu/e176/lectures/NM/node25.html>
[Haettu 14 4 2021].

Weston, S., 2018. Nuclear Reactor Physics. Kolmas painos toim. Newark: John Wiley & Sons.

Taulukko I. 1. LO1 ja LO2 TTKE:n mukaiset tehon nostonopeusrajoitukset.

TEHONMUUTOSTILANNE							
Lämpöteho alue	Latauksen jälkeen		Aika tehon laskusta				
			> 7 vrk	1 - 7 vrk	1 - 24 h	< 1 h	
100 %	dt > 48 h		dt > 48 h	-	-	-	
90 – 100 %	P(GEN) < 5MW/h		P(GEN) < 5MW/h	P(GEN) < 15MW/h	P(GEN) < 60MW/h	P(GEN) < 120MW/h	
90 ± 2 %	dt > 12 h		dt > 6 h	dt > 2 h	dt > 1 h	-	
52 – 90 %	jatkuva tehon nosto P(GEN) < 10MW/h	tehon nosto 10 % askelin P(GEN) < 20MW/h dt > 2h/askel	jatkuva tehon nosto P(GEN) < 15MW/h	tehon nosto 10 % askelin P(GEN) < 40MW/h dt > 2 h/askel	P(GEN) < 30 MW/h	P(GEN) < 100MW/h	P(GEN) < 300MW/h
52 ± 3 %	dt > 5 h		dt > 3 h	dt > 3 h	dt > 1 h	-	
15 – 52 %	35 – 52 %	P(GEN) < 20MW/h	P(GEN) < 60MW/h	P(GEN) < 100MW/h	P(GEN) < 200MW/h	P(GEN) < 300MW/h	
	15 – 35 %	P(GEN) < 40MW/h					
0 – 15 %	P(GEN) < 300MW/h		P(GEN) < 300 MW/h	P(GEN) < 300MW/h	P(GEN) < 300MW/h	P(GEN) < 300MW/h	
Huom.	<p>Sallitut tehon nostonopeudet on annettu generaattoritehona P(GEN).</p> <p>dt on stabilointiaika askelten tai tehotasojen välillä. Jos tehoa alennetaan alle ko. tehotason ennen kuin stabilointiaika on kulunut, on tehon nosto tehtävä ikään kuin ko. tehotasolla ei olisi lainkaan oltu.</p> <p>100 % lämpöteho = 1500 MW.</p>						

"LO2 REAKTORIN SUORITUSARVOLASKENNAN MITTAUSTIEDOT"
 "EFEKT. ARVOT 2019-09-13 KLO 5.00.... 2019-09-16 KLO 0.00"

"YQ30 T"

250.0	1	270.3	0	250.0	1	278.5	0	250.0	1	250.0	1
279.4	0	270.5	0	270.5	0	285.0	0	293.3	0	298.1	0
299.6	0	294.1	0	284.0	0	270.4	0	276.1	0	285.1	0
285.8	0	303.3	0	302.8	0	302.5	0	285.8	0	276.1	0
299.4	0	303.0	0	295.2	0	301.9	0	303.3	0	295.3	0
300.8	0	298.9	0	250.0	1	280.7	0	302.7	0	299.9	0
301.2	0	298.3	0	302.6	0	279.1	0	269.6	0	281.3	0
298.2	0	302.1	0	298.9	0	297.2	0	303.9	0	297.2	0
297.2	0	305.3	0	299.7	0	296.0	0	301.9	0	296.1	0
279.4	0	269.7	0	270.2	0	304.4	0	301.7	0	305.1	0
297.5	0	293.9	0	303.2	0	294.2	0	301.1	0	280.2	0
250.0	1	301.9	0	302.8	0	297.4	0	293.8	0	296.2	0
301.2	0	278.0	0	276.9	0	292.5	0	302.7	0	295.4	0
297.0	0	297.0	0	296.9	0	298.1	0	296.3	0	300.7	0
302.2	0	275.4	0	270.7	0	285.5	0	299.7	0	304.6	0
294.2	0	296.9	0	306.1	0	299.0	0	304.2	0	293.6	0
300.9	0	300.0	0	284.2	0	270.4	0	250.0	1	296.8	0
298.1	0	299.8	0	298.2	0	297.7	0	296.2	0	300.8	0
286.1	0	286.6	0	296.7	1	250.0	1	299.1	0	304.5	0
294.8	0	296.4	0	250.0	1	298.5	0	250.0	1	296.1	0
303.7	0	298.5	0	301.4	0	300.2	0	293.8	0	303.3	0
250.0	1	297.9	0	303.6	0	297.1	0	305.9	0	296.7	0
250.0	1	296.6	0	301.2	0	303.9	0	292.4	0	250.0	1
301.5	0	298.4	0	297.3	0	296.4	0	302.0	0	278.0	0
250.0	1	250.0	1	304.2	0	303.4	0	302.5	0	298.1	0
295.2	0	250.0	1	295.0	0	250.0	1	250.0	1	302.4	0
302.0	0	280.3	0	294.5	0	299.1	0	302.8	0	296.1	0
299.5	0	297.9	0	304.9	0	250.0	1	298.5	0	295.3	0
301.5	0	297.0	0	294.7	0	280.3	0	304.7	0	302.3	0
299.4	0	302.7	0	302.2	0	298.3	0	303.4	0	279.3	0
293.4	0	302.0	0	296.4	0	301.8	0	302.9	0	250.0	1
302.2	0	300.5	0	293.8	0	279.4	0	250.0	1	287.1	0
303.9	0	303.7	0	303.0	0	299.3	0	286.2	0	293.8	0
250.0	1	298.7	0	250.0	1	250.0	1	276.4	0	280.1	0
281.0	0	280.4	0	275.9	0	250.0	1	270.2	0	293.8	0

"YQ10 T"

250.0	1	270.2	0	270.2	0	270.2	0	250.0	1	250.0	1
268.2	0	270.1	0	260.6	1	270.0	0	267.2	0	270.3	0
269.7	0	250.0	1	269.9	0	269.8	0	269.7	0	269.5	0
270.5	0	269.6	0	268.6	0	270.6	0	268.6	0	267.7	0
269.0	0	271.5	0	270.3	0	270.4	0	268.4	0	269.7	0
270.4	0	270.4	0	268.6	0	269.5	0	250.0	1	268.7	0

"YQ20 X-RH"

0.000	1	0.000	1	0.000	1	0.000	1
0.638	0	0.739	0	0.736	0	0.588	0
0.862	0	1.026	0	1.025	0	0.848	0
0.364	0	0.426	0	0.448	0	0.406	0
0.000	1	0.000	1	0.000	1	0.000	1
0.000	1	0.000	1	0.000	1	0.000	1
0.976	0	1.135	0	1.147	0	0.940	0
-0.002	1	-0.002	1	-0.001	1	-0.001	1
0.207	0	0.246	0	0.254	0	0.226	0
0.636	0	0.014	1	0.772	0	0.675	0
0.887	0	1.059	0	1.050	0	0.843	0
0.669	0	0.792	0	0.816	0	0.716	0
0.584	0	0.676	0	0.706	0	0.625	0
-0.003	1	-0.003	1	-0.002	1	-0.001	1
0.628	0	0.729	0	0.741	0	0.617	0
0.812	0	0.933	0	0.968	0	0.801	0
0.373	0	0.432	0	0.453	0	0.403	0
0.285	1	0.289	1	0.329	1	0.380	1
0.694	0	0.815	0	0.856	0	0.760	0
0.415	0	0.476	0	0.501	0	0.452	0
0.348	0	0.415	0	0.426	0	0.359	0
0.241	1	0.322	0	0.351	0	0.338	0
1.031	0	1.167	0	1.167	0	0.945	0
0.989	0	1.160	0	1.158	0	0.935	0
0.208	0	0.244	0	0.251	0	0.225	0
0.000	1	0.428	0	0.462	0	0.437	0
0.232	0	0.275	0	0.301	0	0.293	0

```

0.664 0 0.780 0 0.811 0 0.719 0
0.253 0 0.296 0 0.303 0 0.263 0
0.630 0 0.735 0 0.751 0 0.624 0
0.726 0 0.840 0 0.842 0 0.663 0
0.281 0 0.330 0 0.349 0 0.333 0
0.239 0 0.279 0 0.278 0 0.223 0
0.476 0 0.556 0 0.564 0 0.463 0
0.000 1 0.000 1 0.000 1 0.000 1
0.165 0 0.192 0 0.201 0 0.178 0
"YQ20 X-V"
0.000 1 -0.072 0 -0.087 0 -0.062 0 0.000 1 0.000 1
-0.064 0 0.000 1 -0.027 0 -0.081 0 -0.050 0 -0.081 0
-0.057 0 0.000 1 -0.079 0 -0.072 0 -0.074 0 -0.081 1
0.000 1 -0.068 0 -0.041 0 -0.058 0 -0.070 0 -0.068 0
-0.026 0 -0.061 0 -0.057 0 -0.084 0 -0.032 0 -0.080 0
-0.089 0 -0.070 0 -0.022 0 -0.058 0 0.000 1 -0.022 0
"YS00 S"
10.5 0 10.5 0 10.5 0 10.5 0 10.5 0 9.7 0
10.5 0 9.6 0 10.5 0 10.5 0 10.5 0 10.5 0
10.5 0 10.5 0 10.5 0 10.5 0 9.6 0 10.5 0
9.7 0 10.5 0 9.7 0 10.5 0 10.5 0 10.5 0
10.5 0 10.5 0 10.5 0 10.5 0 10.5 0 9.7 0
10.5 0 9.6 0 10.5 0 10.5 0 10.5 0 10.5 0
10.5 0
"YX13X801"
78.8 0
"YA F801"
1405.6 0 1448.2 0 1418.9 0 1545.4 0 1464.3 0 1543.9 0
"YA T803"
294.1 0 292.1 0 294.2 0 294.3 0 293.1 0 293.7 0
"YA T805"
267.2 0 267.6 0 267.7 0 268.6 0 267.6 0 268.1 0
"YC00Q801"
1184.8 0
"ENERGIA"
70999.8 0
"TV00A802"
1229.7 0
"YA10P801"
121.9 0
"YC10P001"
2.921 0
"VARA 1"
0.00 2
"VARA 2"
0.00 2
"VARA 3"
0.00 2
"VARA 4"
0.00 2
"VARA 5"
0.00 2
"VARA 6"
0.00 2 0.00 2 0.00 2 0.00 2 0.00 2 0.00 2
"VARA 7"
0.00 2 0.00 2 0.00 2 0.00 2 0.00 2 0.00 2
"END"

```

Taulukko II. 1. RML-nauhan syötteiden tunnuksien kuvaukset. * Käytetään, mikäli todetaan energiataseesta laskettua termistä tehoa tarkemmaksi.

RML-tunnus	Kuvaus	Yksikkö	Vaikutusta laskentaan?
YQ30T	Polttoaineniippujen lähtölämpötilan mittaus	°C	Kyllä
YQ10T	Polttoaineniippujen tulolämpötilan mittaus	°C	Ei
YQ20 X-RH	Rh-antureiden neutronivuon mittaus	µA	Kyllä
YQ20 X-V	Taustasäteilyn mittaus kaapelilla	µA	Ei
YS00 S	Säätösauvojen asennot	-	Kyllä
YX13X801	Neutronivuon mittauksilla määritetty reaktorin teho	%	Kyllä*
YA F801	Kiertopiirin massavirtaukset	kg/s	Kyllä
YA T803	Jäähdytteen lämpötila kuumahaaramittauksesta	°C	Kyllä
YA T805	Jäähdytteen lämpötila kylmähaaramittauksesta	°C	Kyllä
YC00Q801	Reaktorin teho energiataseesta	MW	Kyllä
ENERGIA	Aika-askeleen aikana tuotettu energia	MWh	Kyllä
TV00A802	Mitattu booripitoisuus	ppm	Ei
YA10P801	Primääripiirin paine kuumahaarasta mitattuna	bar	Kyllä
YC10P001	Paine-ero sydämen yli	bar	Ei