



Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

**OL1 JA OL2 YDINVOIMALAITOSTEN TERMISTEN MARGINAALIEN  
MANUAALINEN MÄÄRITYS**

**MANUAL CALCULATION OF THERMAL MARGINS OF OL1 AND OL2  
NUCLEAR POWER PLANTS**

Työn ohjaaja: DI Mikko Tammela

Työn tarkastaja: Professori Riitta Kyrki-Rajamäki

Lappeenranta 12.2.2014

Markus Repo

# TIIVISTELMÄ

Markus Repo

OL1- ja OL2-ydinvoimalaitosten termisten marginaalien manuaalinen määrittäminen

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2014

39 sivua, 2 taulukkoa ja 14 kuvaa.

Hakusanat: Kandidaatintyö, Olkiluoto, Teollisuuden Voima, kiehumisvesireaktori, termiset marginaalit, LHGR, CPR, dryout, lineaariteho, Simulate, Kriging

Työn teoriaosuudessa perehdytään ydinvoimalaitoksiin OL1 ja OL2, lämmönsiirtoon kiehumisvesireaktorissa sekä dryout-ilmiön ja lineaaritehon marginaaleihin. Dryout-ilmiön ja lineaaritehon marginaalit ovat kiehumisvesireaktorin turvallisen käytön ja käytön suunnittelun kannalta keskeisiä lämmönsiirtoa polttoaineesta jäädytteeseen kuvaavia marginaaleja.

Tavoitteena ollut uuden manuaalisen laskentatavan kehitys reaktorin termisille marginaaleille käydään läpi vaihe vaiheelta. Uudessa laskentatavassa käytetään Simulate-3 sydänsimulaattoria ja tavallista Kriging-interpolointimenetelmää. Lisäksi uuden laskentatavan tarkkuutta tarkastellaan koko käyttöjakson ajalla sekä tehonmuutostilanteissa.

Symboliluettelo.....	3
1 Johdanto .....	5
2 Teollisuuden Voima Oyj.....	6
2.1 Ydinvoimalaitokset Olkiluoto 1 ja 2.....	6
2.1.1 Polttoaine .....	7
2.1.2 Säätösauvat.....	10
3 Lämmönsiirto reaktorissa.....	12
3.1 Lineaariteho, lämpövuoto ja tehotiheys .....	12
3.2 Muotokertoimet .....	14
3.3 Lämmönsiirto polttoaineesta jäähdytteeseen .....	14
3.4 Jäähdytteen kiehumisen ja lämmönsiirtokriisi.....	16
4 Termiset marginaalit .....	19
4.1 Suurin sallittu lineaariteho ja lineaaritehon marginaali .....	19
4.2 Dryout-kertoimen alaraja ja dryout-marginaali.....	20
5 Reaktorisydämen simulaatio .....	22
5.1 Simulate-3 .....	22
6 Uuden laskentatavan kuvaus .....	23
6.1 Simulate-3:n input-tiedostot.....	24
6.2 Laskentapisteiden valinta .....	24
6.2.1 Jakson energia ja säätösauvasekvenssi .....	25
6.2.2 Reaktorin teho ja pääkiertovirtaus.....	26
7 Yhdeksänulotteinen interpolointi .....	28
7.1 Interpolointi Microsoft Office Excelillä .....	28
7.1.1 Kriging-interpolaatio .....	28

7.1.2	Tavallinen Kriging-menetelmä.....	29
8	Interpoloinnin tarkkuus.....	31
8.1	Tarkkuus koko käyttöjakson aikana .....	31
8.2	LHGR-marginaalin korjauskerroin.....	34
8.3	Marginaalit tehonmuutostilanteissa .....	35
9	Yhteenveto .....	39
	Viitteet.....	40

## SYMBOLILUETTELO

### Roomalaiset

$A$	pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$B$	palama	[MWd/kgU]
$E$	jakson energia	[EFPH]
$e_f$	fissioenergia	[MeV]
$F$	muotokerroin	
$k$	lämmönjohtavuus	[mW/cm°C]
$L$	pituus	[m]
$P$	noodin suhteellinen teho	
$q'$	lineaariteho	[W/cm]
$q''$	lämpövuoto	[W/cm <sup>2</sup> ]
$q'''$	tehotiheys	[W/cm <sup>3</sup> ]
$P$	teho	[W], [%]
$R_f$	fissionopeus	[cm <sup>-3</sup> s]
$V$	tilavuus	[m <sup>3</sup> ]
$T$	lämpötila	[K, °C]

### Kreikkalaiset

$\Sigma$	makroskooppinen vaikutusala	[cm <sup>-1</sup> ]
$\Omega$	terminen vastus	[cm <sup>2</sup> K/W]
$\Phi$	neutronivuoto	[cm <sup>-2</sup> s]

### Lyhenteet

BWR	Boiling Water Reactor
CMS	Core Management System
CPR	Critical Power Ratio
CRX	Säätösauva-ajoryhmä X
DNB	Departure from Nucleate Boiling

EFPH	Equivalent Full Power Hour
EPR	European Pressurized Reactor
FLCPR	Fraction of Limiting Critical Power Ratio
FLPD	Fraction of Limiting Power Density
LWR	Light Water Reactor
LHGR	Linear Heat Generation Rate
MFLCPR	Maximum Fraction of Limiting Critical Power Ratio
MFLPD	Maximum Fraction of Limiting Power Density
OL1	Olkiluodon ydinvoimalaitosyksikkö 1
OL2	Olkiluodon ydinvoimalaitosyksikkö 2
PCI	Pellet Cladding Interaction
PPF	Power Peaking Factor
PWR	Pressurized Water Reactor
SSP	Studsвик Scandpower
TMOL	Thermal Mechanical Operating Limit
TTKE	Turvallisuustekniset käyttöehdot
TVO	Teollisuuden Voima Oyj

#### Alaindeksit

ave	keskimääräinen
ax	aksiaalinen
c	kriittinen
f	fissio
marg	marginaali
rad	radiaalinen
sat	kyllästymis
th	terminen
tot	yhteensä, kokonais-
w	seinämä

## 1 JOHDANTO

Kiehusvesireaktorin termiset marginaalit ovat rajoittavia marginaaleja, jotka kuvaavat lämmönsiirtoa polttoaineesta jäähdytteeseen. Käsiteltävät marginaalit ovat lineaaritehon ja kuivumis- eli dryout-ilmiön-marginaali. Marginaalien arvojen tunteminen käytön aikana ja tulevaa käyttöä suunniteltaessa on reaktorin turvallisen käytön kannalta tärkeää, sillä marginaalit eivät saa olla missään tilanteessa negatiiviset.

Normaalin käytön aikana termiset marginaalit määritetään automaattisesti ydinvoimalaitoksen valvomon laitostietokoneilla ja tarvittaessa reaktori-insinöörin työpisteellään suorittamalla sydänlaskulla. Työssä kuvataan uusi tapa määrittää reaktorin termiset manuaalit ilman laitostietokonetta tai reaktori-insinöörin sydänlaskua. Uusi laskentatapa korvaa reaktorisydämen käyttöohjeessa nykyisin esitetyn tavan, jolla termiset marginaalit voidaan laskea manuaalisesti. Vanha laskentatapa on epätarkka ja useita paperilla suoritettavia laskuja vaativana hidas käytettävä, joten tarkemman ja käyttäjäystävällisen menetelmän kehitys on aiheellista.

Työn tavoitteena on kehittää termisille marginaaleille jokaisessa realistisessa ajopisteessä toimiva laskentatapa, jonka tulokset saadaan luettua millä tahansa tietokoneella Excel-laskentataulukosta Työssä esiteltävä menetelmä vaatii ennakkolaskujen suorittamista Simulate-3-ohjelmistolla jokaiselle käyttäjaksolle ja voimalaitokselle erikseen. Kandidaatin-työ on tehty Teollisuuden Voima Oyj:n reaktorin valvonta-jaokselle.

## 2 TEOLLISUUDEN VOIMA OYJ

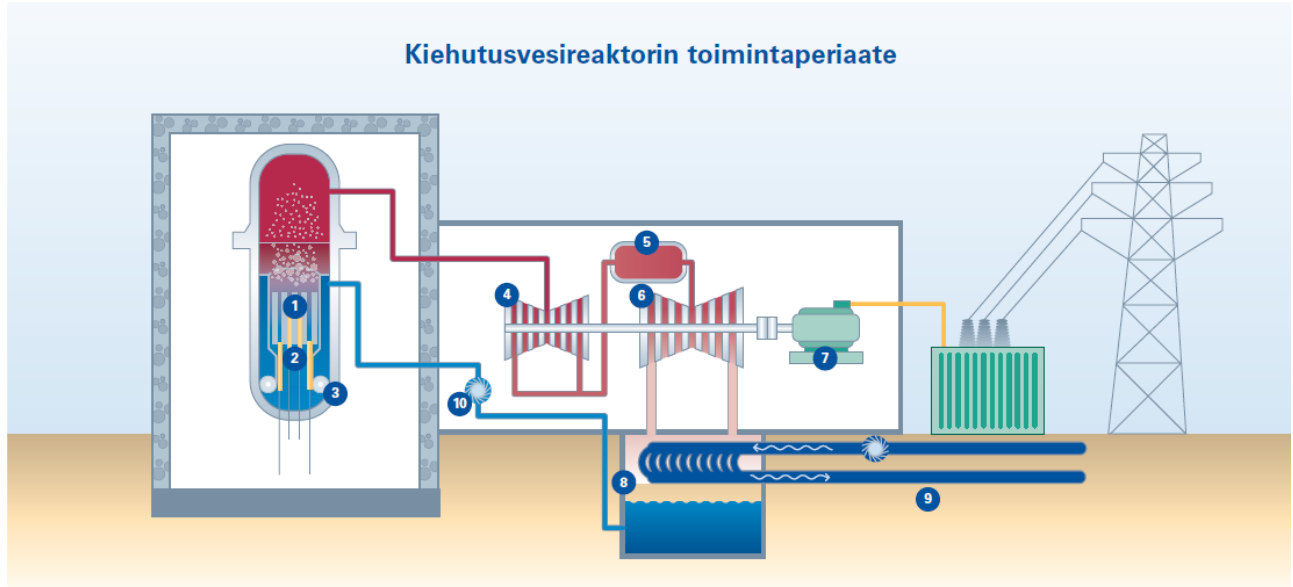
Teollisuuden Voima Oyj (TVO) on suomalainen ydinvoimayhtiö, joka tuottaa noin kuudenneksen Suomessa käytettävästä sähköstä. TVO omistaa ja käyttää kahta Eurajoen Olkiluodolla käyvää sähköteholtaan 880 MW ydinvoimalaitosta sekä rakentaa Olkiluotoon Arevan EPR-ydinvoimalaitosta. Olkiluodon neljännen ydinvoimalaitoksen projekti on kilpailuvaiheessa. Lisäksi TVO omistaa osuuden ydinjätteen loppusijoitusyhtiö Posivasta, Meri-Porin lauhdevoimalaitoksesta ja 1 MW tuuliturbiinin Olkiluodossa. TVO tuottaa omistajilleen sähköä omistusosuutta vastaan Mankala-periaatteen mukaisesti omakustannushintaan. (Teollisuuden Voima Oyj 2013, 5)

### 2.1 Ydinvoimalaitokset Olkiluoto 1 ja 2

TVO:n omistamat ydinvoimalaitokset ovat Olkiluoto 1 (OL1) ja Olkiluoto 2 (OL2). Molemmat peruspiirteiltään identtiset voimalaitokset ovat tuottaneet sähköverkkoon energiaa yli 30 vuotta. OL1:n tuotantokäyttö alkoi vuonna 1978 ja OL2:n vuonna 1980. Kummankin laitoksen nettosähköteho on nykyisin 880 MW ja lämpöteho 2500 MW. Laitokset ovat AB Asea Atomin (nykyisin Westinghouse Electric Company LLC) toimittamia. (Teollisuuden Voima Oyj 2013, 9)

Pääosa maailman ydinvoimalaitoksista on kevytvesijäähdytteisiä laitoksia. Kevytvesireaktoreita on kahta päätyyppiä: painevesi- (PWR, Pressurized Water Reactor) ja kiehutusvesireaktoreita (BWR, Boiling Water Reactor). OL1 ja OL2 ovat kiehutusvesireaktoreita. Kiehutusvesireaktorissa jäähdytteenä kiertävä tavallinen vesi kiertää yhtä kiertopiiriä eli primääripiiriä. Primääripiirin merkittävimmät osat ovat reaktori, turbiinit, välitulistin, lauhdutin ja syöttövesipumput. Kiehutusvesireaktorin yksinkertaistettu rakenne ja toimintaperiaate selviävät kuvasta 1.





*Kiehausvesireaktorissa vesi kiehuu reaktorin sisällä **polttoainesauvojen (1)** välissä kulkiessaan. Reaktorin tehoa säädetään **säätösauvoilla (2)** ja **pääkiertopumpuilla (3)**. Reaktorissa muodostunut höyry johdetaan päähöyryputkilla **korkeapaineturpiinille (4)**. Luovutettuaan osan energiastaan korkeapaineturpiinissa höyry johdetaan **välitulistimille (5)**, joissa höyry kuivataan ja tulistetaan, ja johdetaan sen jälkeen **matalapaineturpiineille (6)**. Turpiinit*

*pyörittävät samalle akselille kytkettyä **generaattoria (7)**, joka tuottaa sähköä valtakunnan verkkoon. Matalapaineturpiineilta tuleva höyry lauhdutetaan vedeksi **lauhduttimessa (8)** **meriveden (9)** avulla. Lauhdevesi pumpataan lauhdepumpuilla esilämmittimien ja puhdistusjärjestelmän kautta **syöttövesipumpuille (10)**, jotka pumpaavat sen syöttövetenä takaisin reaktoriin. Lämmennyt merivesi johdetaan lauhduttimesta takaisin mereen.*

**Kuva 1.** Kiehausvesireaktorin toimintaperiaate. (Teollisuuden Voima Oyj 2007, 5)

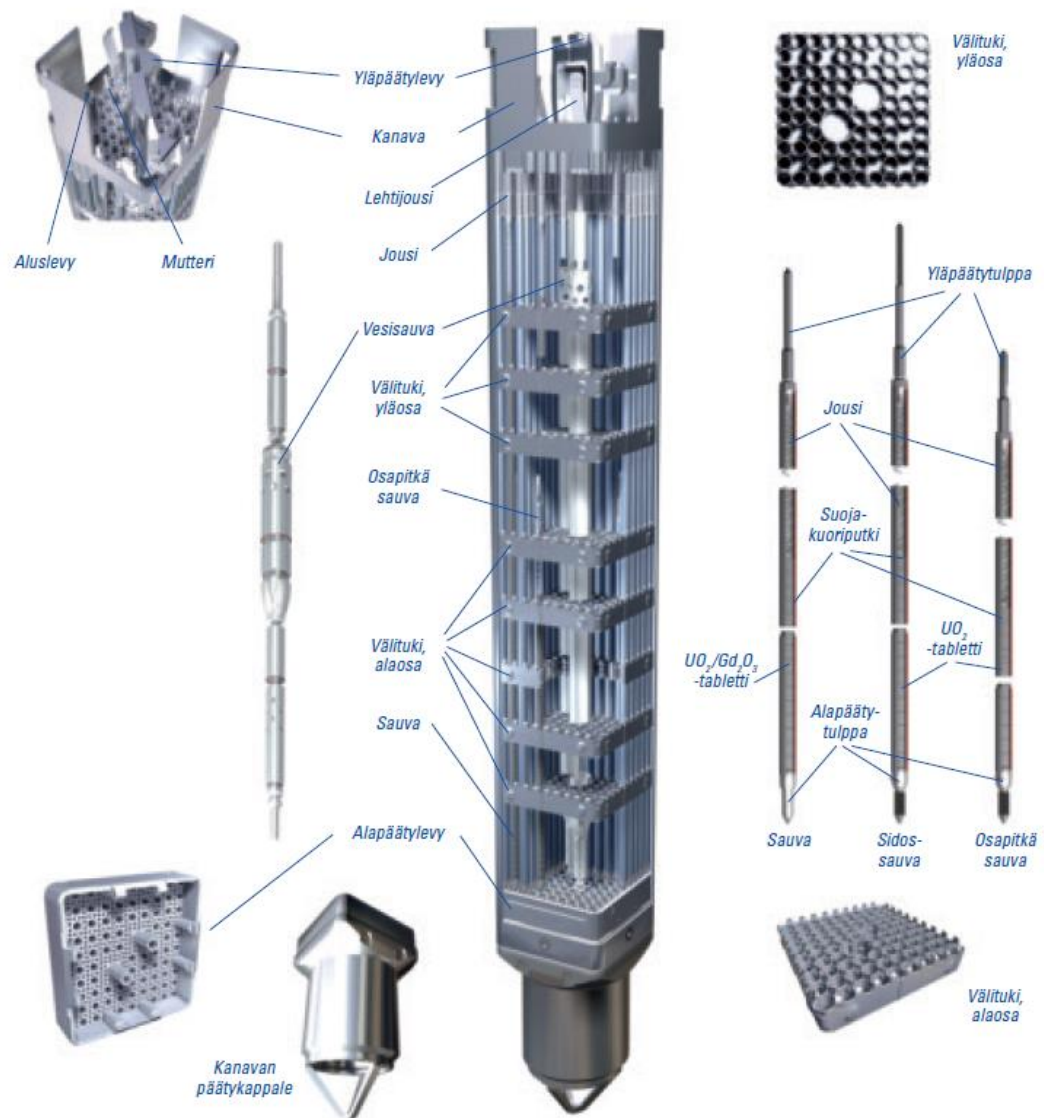
### 2.1.1 Polttoaine

Reaktorissa käytettävän polttoaineen rakenteella, mallilla ja väkevyydellä on paljon vaikutusta reaktorin ajotapaan ja käyttäytymiseen. TVO:n polttoaine on U-235-isotoopin suhteen väkevöityä uraanidioksidia ( $\text{UO}_2$ ). Käytettävä väkevöintiaste on 2 - 5 %.

Kiehausvesilaitoksen reaktorissa on laitoksen koosta riippuen 400–800 polttoaine-elementtiä, joista jokainen sisältää 60–100 polttoainesauvaa. OL1- ja OL2-laitosten reaktoreissa on 500 polttoaine-elementtiä, joissa polttoainetta on yhteensä noin 90 tonnia. Polttoaine-elementti koostuu polttoainenipusta ja sitä ympäröivästä Zircaloy-2-materiaalista valmistetusta polttoainekanaavasta. Polttoaine on sauvan sisällä sintrattuina tabletteina. Käytettävissä polttoainenipuissa on polttoainesauvoja 10 x 10 matriisissa. Aiemmin on käytetty myös 8 x 8 ja 9 x 9 matriiseja. Nipun sisältämien polttoainesauvojen lukumäärän kasvu ja halkaisijan pieneneminen ovat pienentäneet lineaaritehoja ja parantaneet siten

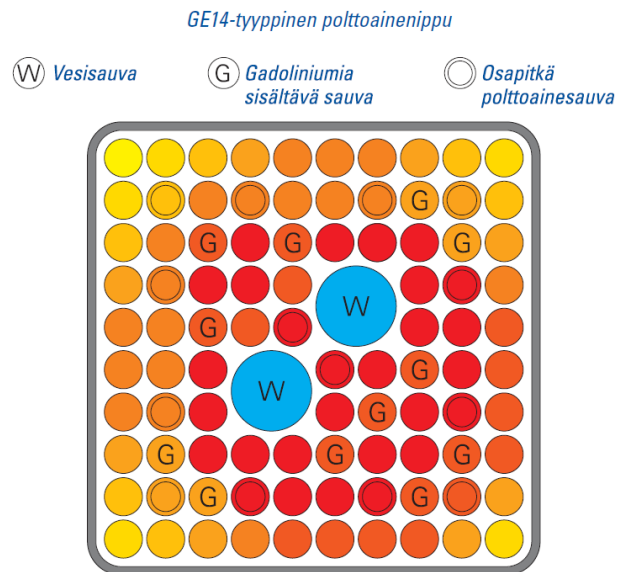
sauvojen suojakuoren kestävyyttä ja turvallisuutta. Normaalisti polttoainenippu on reaktorrissa neljästä viiteen vuotta. Tuona aikana polttoainenipun suurin sallittu keskimääräinen palama on 50 MWd/kg. (Teollisuuden Voima Oyj 2013, 18–21)

TVO hankkii polttoaineen pitkillä sopimuksilla kilpailuttaen eri valmistajia. TVO:n käyttämiä polttoainetoimittajia ovat AREVA NP GmbH, GNF ENUSA Nuclear Fuel S.A., GENUSA ja Westinghouse Electric Sweden AB. Eri valmistajien polttoaineet eroavat toisistaan muun muassa vesikanavan sijainnilla, osapitkien sauvojen sijoittelussa ja palavan absorbaattorin käytössä. Osa TVO:n käyttämistä polttoaineista sisältää palavana absorbaattorina gadoliniumoksidia ( $Gd_2O_3$ ). Kuvasta 2 selviää käytössä olevan GE-14-polttoainenipun rakenne.



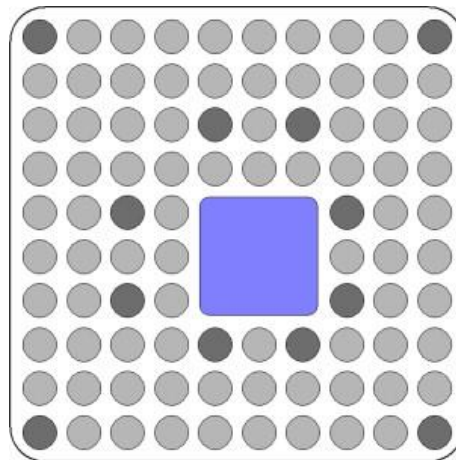
**Kuva 2.** GE-14 polttoainenipun osat. (Teollisuuden Voima Oyj 2013, 19)

Polttoainenippujen keskivaiheilla on vesikanavia ja osa sauvoista on osapitkiä. Vesikanavat voivat olla pyöreitä, nelikulmaisia tai ristinmuotoisia. Vesikanavien ja osapitkien sauoja käyttö parantaa reaktorin toimintaa korkealla teholla ja häiriötilanteissa. Niiden ansiosta nipun yläpäähän saadaan enemmän vettä, mikä parantaa neutronien hidastumista, moderointia ja tasoittaa aksiaalista tehojakaumaa. (Kyrki-Rajamäki, 2012b, 104–105) Kuvassa 3 on GE14-tyyppisen polttoainenipun läpileikkaus.



**Kuva 3.** GE-14-tyyppisen polttoainenipun läpileikkaus. Värin tummuus kuvaa polttoainesauvan väkevöintiä. (Teollisuuden Voima Oyj 2007, 15)

Kuvassa 4 on Areva Atrium 10XM-polttoainenipun läpileikkaus.



**Kuva 4.** Areva Atrium 10XM-tyyppisen polttoainenipun läpileikkaus. Vaaleat sauvat ovat täyspitkiä, tummat osapitkiä ja neliskulmainen sinertävä alue on vesikanava. (Gabriel & Glück 2011, 14)

### 2.1.2 Säätösauvat

Säätösauvojen tehtävä on reaktorin kasvutekijän ja tehojakautaman säätäminen sekä reaktorin tehon pysäyttäminen tarvittaessa. Kasvutekijän säätämiseen käytetään Olkiluodon kiehumusvesilaitoksilla myös jäähdytevirtauksen hallintaa. (Kyrki-Rajamäki, 2012a, 11) Kasvutekijällä tarkoitetaan tietyssä sukupolvessa syntyvien neutronien lukumäärän suhdetta

edellisessä neutronisukupolvessa olleiden neutronien lukumäärään. Kasvutekijän ollessa yksi sanotaan reaktorin olevan kriittinen. Kasvutekijän arvon ollessa yli yhden sanotaan reaktorin olevan ylikriittinen ja sen teho kasvaa. Kasvutekijän ollessa alle yhden sanotaan reaktorin olevan alikriittinen ja sen teho vähenee. (Kalli, 65–66)

Kiehutusvesireaktorin säätösauvat ovat ristinmuotoisia neljän polttoainepun eli supercellin keskelle sijoitettuja. Säätösauvat sisältävät boorikarbidia ( $B_4C$ ) tai hafniumia (Hf), jotka ovat neutroneja voimakkaasti absorboivia materiaalia. Reaktorissa on 121 säätösauvaa. (Teollisuuden Voima Oyj, 2013, 22)

Olkiluodon laitoksilla säätösauvat on jaettu neljän sauvan ajoryhmiin, jolloin neljän sauvan ryhmiä on 30 kappaletta ja reaktorin keskisauva muodostaa oman ajoryhmänsä. Ryhmistä pääosa on pikasulkuryhmiä, jotka ovat tehoajon ajan kokonaan ulosvedettyjä. Säätösauvan reaktiivisuusvaikutus riippuu säätösauvan sijainnista reaktorissa, säätösauvan palamasta ja reaktorin tehojakaumasta. Suurin yksittäinen reaktiivisuusvaikutus on reaktorin keskisauvalla positiossa O50.

### 3 LÄMMÖNSIIRTO REAKTORISSA

Luvussa käsitellään ydinvoimalaitoksen reaktorin lämmönsiirron osalta peruskäsitteistö, lämmönsiirtoa polttoainesauvoista jäähdytteeseen ja erityistä lämmönsiirron ongelmatilannetta, lämmönsiirtokriisiä.

#### 3.1 Lineaariteho, lämpövuoto ja tehotiheys

Lineaariteho on pääasiassa ydinreaktorien lämmönsiirron yhteydessä käytetty suure, joka kuvaa siirtyvää polttoainesauvan lämpötehoa pituusyksikköä kohden. Lineaaritehon merkintä on  $q'$  ja sen yksikkönä käytetään W/cm tai kW/cm. Lineaaritehosta käytetään myös nimitystä LHGR (Linear Heat Generation Rate). Paikallinen lineaariteho laskentanoodissa määritellään seuraavasti. (Latokartano, 20)

$$q' = \frac{P_{th}(1 - \gamma_{tot})P}{n_{tot}} \cdot \frac{F_{rad}F_{ax}}{L} \quad (1)$$

, missä

$P_{th}$	on reaktorin termien teho	[MW]
$P$	on noodin suhteellinen teho	
$n_{tot}$	on noodien lukumäärä	
$F_{rad}$	on noodin sisäinen radiaalinen muotokerroin	
$F_{ax}$	on noodin sisäinen aksiaalinen muotokerroin	
$L$	on noodin sisältämien polttoainesauvojen yhteispituus noodissa	

Reaktorisydämen keskimääräinen lineaariteho saadaan laskettua jakamalla reaktorin lämpöteho polttoainesauvojen yhteispituudella.

$$q'_{ave} = \frac{P_{th}}{L_{tot}} \quad (2)$$

, missä

$L_{tot}$	on polttoainesauvojen yhteispituus	[m]
-----------	------------------------------------	-----

Suurimmat lineaaritehot esiintyvät yleensä jakson alkupäässä, jolloin yhden jakson reaktorissa olleiden nippujen reaktiivisuus ja tuoreiden nippujen tehon sisäinen muotokerroin

ovat suurimmillaan. Aksiaalisesti katsottuna suurimmat lineaaritehot esiintyvät jakson alkupuolella tavallisimmin sydämen alaosissa. Jakson loppupuolella suurimmat lineaaritehot saattavat sijaita myös sydämen yläosissa. (Latokartano, 18)

Lämpövuoto on yleinen lämmönsiirron peruskäsite, joka kuvaa pinta-alan läpi siirtyvää lämpötehoa. Lämpövuotoa merkitään  $q''$  ja sen yksikkönä käytetään  $W/cm^2$  tai  $kW/cm^2$ . Reaktorisydämen keskimääräinen lämpövuoto saadaan laskettua jakamalla reaktorin lämpöteho polttoainesauvojen yhteispinta-alalla.

$$q''_{ave} = \frac{P_{th}}{A_{tot}} \quad (3)$$

, missä

$A_{tot}$  on polttoainesauvojen yhteispinta-ala  $[m^2]$

Tehotiheys kuvaa tuotettua tehoa tilavuusyksikköä kohden. Tehotiheyttä merkitään  $q'''$  ja sen yksikkönä käytetään usein  $W/cm^3$ . Tehotiheys saadaan kertomalla fissionopeus yhdessä fission vapautuvalla energialla.

$$q''' = e_f R_f = e_f \Sigma_f \Phi = \frac{P}{V} \quad (4)$$

, missä

$e_f$  on fissioenergia  $[MeV]$

$R_f$  on fissionopeus  $[cm^{-3}s]$

$\Sigma_f$  on makroskooppinen fissiovaikutusala  $[cm^{-1}]$

$\Phi$  on neutronivuo  $[cm^{-2}s]$

Reaktorisydämen keskimääräinen tehotiheys saadaan laskettua jakamalla reaktorin lämpöteho polttoainesauvojen yhteistilavuudella.

$$q'''_{ave} = \frac{P_{th}}{V_{tot}} \quad (5)$$

, missä

$V_{tot}$  on polttoaineen kokonaistilavuus  $[m^3]$

### 3.2 Muotokertoimet

Usein on tarpeellista käsitellä kuuminta yksittäistä jäähdytyskanavaa ja sydämen tehojakaamaa. Yksinkertaistettuna näitä voidaan käsitellä muotokertoimilla. Sydämen tehojakauman ja muotokertoimien avulla pystytään havaitsemaan sydämen stabiiliuden kannalta epäedulliset olosuhteet. Muotokertoimia määritellään kolme, radiaalinen- ( $F_{\text{rad}}$ ), aksiaalinen- ( $F_{\text{ax}}$ ) ja kokonaismuotokerroin ( $F_{\text{tot}}$  tai  $PPF$ , Power Peaking Factor). (Nurminen, 9)

$$F_{\text{ax}} = \frac{q'_{\text{ave,kuormitetuin noodi}}}{q'_{\text{ave,tot}}} \quad (6)$$

Aksiaaliselle muotokertoimelle ei ole asetettu suurinta sallittua arvoa.

$$F_{\text{rad}} = \frac{q'_{\text{max,kuormitetuin noodi}}}{q'_{\text{ave,kuormitetuin noodi}}} \quad (7)$$

Radiaalisen muotokertoimen suurimmaksi sallituksi arvoksi on asetettu 1,6.

$$PPF = F_{\text{rad}} \cdot F_{\text{ax}} = \frac{q'_{\text{max,kuormitetuin noodi}}}{q'_{\text{ave,tot}}} \quad (8)$$

Kokonaismuotokertoimelle on asetettu suurimmaksi sallituksi arvoksi 2,7.

Edellä esitetyissä kaavoissa voidaan käyttää lineaaritehon sijasta myös lämpövuota tai tehotiheyttä. Reaktorin käyttöä suunniteltaessa kokonaismuotokertoimen arvo pyritään saamaan mahdollisimman lähelle yhtä, jotta polttoaineen tehojakauma olisi mahdollisimman tasainen. (Kalli, 89)

### 3.3 Lämmönsiirto polttoaineesta jäähdytteeseen

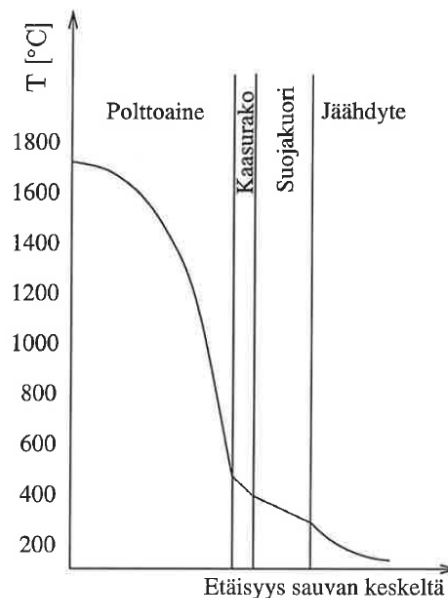
Uraanidioksidia olevien polttoainesauvojen sulamispiste on noin 2800 °C. Lämmönjohtavuusominaisuuksiltaan uraanidioksidi on eriste, sillä sen lämmönjohtavuus on erittäin huono. Esimerkiksi 400 °C lämpötilassa uraanidioksidin lämmönjohtavuus on vain 20 mW/cm°C. Huonon lämmönjohtavuuden takia polttoaineella on suuri radiaalinen lämpötilagradientti. Sauvan keskipisteen lämpötila voi olla 1300 - 2000 °C, kun ulkopinnan lämpötila on vain 400 -500 °C. Suuri lämpötilagradientti rajoittaa polttoainetabletin maksimihalkaisijan 10 mm kokoluokkaan. (Kyrki-Rajamäki, 2012b, 4)



Polttoainetablettien ja sauvan ulkokuorella on kaasurako, joka on leveydeltään noin 75 - 100  $\mu\text{m}$ . Polttoaineen ja suojakuoren välissä on terminen vastus, jonka suuruus riippuu tabletin ja suojakuoren välisen kontaktin laadusta ja kaasuraon leveydestä. Kaasuaukon terminen vastus on yleensä kokoluokkaa 1 - 2  $\text{cm}^2\text{K/W}$  ja lämpötilaero kymmenistä sataan astetta. (Kalli, 106)

Polttoainesauvan suojakuoren sisä- ja ulkopintojen lämpötilaero riippuu suojakuorimateriaalin lämmönjohtavuudesta ja suojakuoren paksuudesta. Zirkonium on materiaalina kohtuullinen lämmönjohdin, joten suojakuoren lämpötilagradientti on pieni. Lämpötilaero ohuessa suojakuoressa on kokoluokaltaan kymmeniä asteita. (Lamarsh & Baratta, 417)

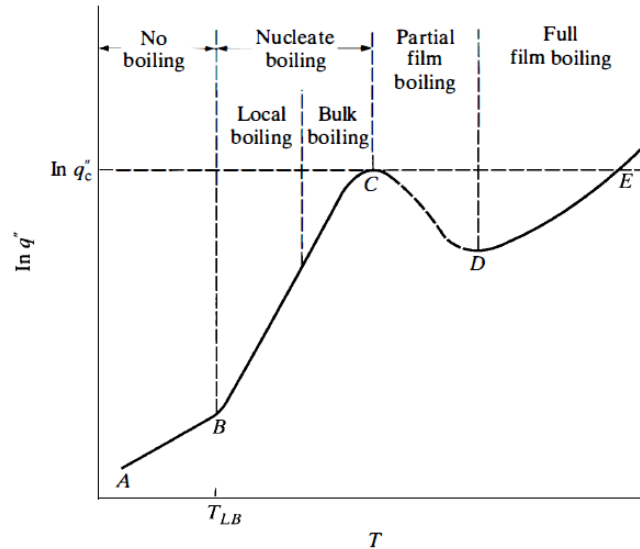
Suojakuoresta lämpö siirtyy pääasiassa konvektiolla jäähdytteeseen. Säteilylämmönsiirto polttoaineesta jäähdytteeseen on vähäistä. Lämmönsiirron laskeminen on tehtävissä tilanteeseen sopivilla konvektiolämmönsiirron korrelaatioilla. Lisäksi jäähdytteen kiehuminen vaikuttaa lämmönsiirtoon. Suojakuoren ja jäähdytteen lämpötilaero on kokoluokaltaan kymmeniä asteita. (Lamarsh & Baratta, 428–436) Kuvassa 5 on havainnollistava esitys polttoainesauvan radiaalisista lämpötilaeroista.



**Kuva 5.** Tyypillinen radiaalinen lämpötilajakauma polttoainesauvasta jäähdytteeseen. (Latokartano, 10)

### 3.4 Jäähdytteen kiehuminen ja lämmönsiirtokriisi

Kiehutusvesireaktorin jäähdyte kiehuu reaktorissa. Kiehumisella tarkoitetaan nesteen höyrystymistä kiinteän aineen ja nesteen rajapinnassa. Kiehumisvaiheet vaikuttavat lämmönsiirron tehokkuuteen. (Incropera, 655) Kuvassa 6 on kiehumiskäyrä, josta ilmenee kiehunnan eri vaiheiden ominaisuudet.



**Kuva 6.** Kiehumiskäyrä (Lamarsh & Baratta, 442)

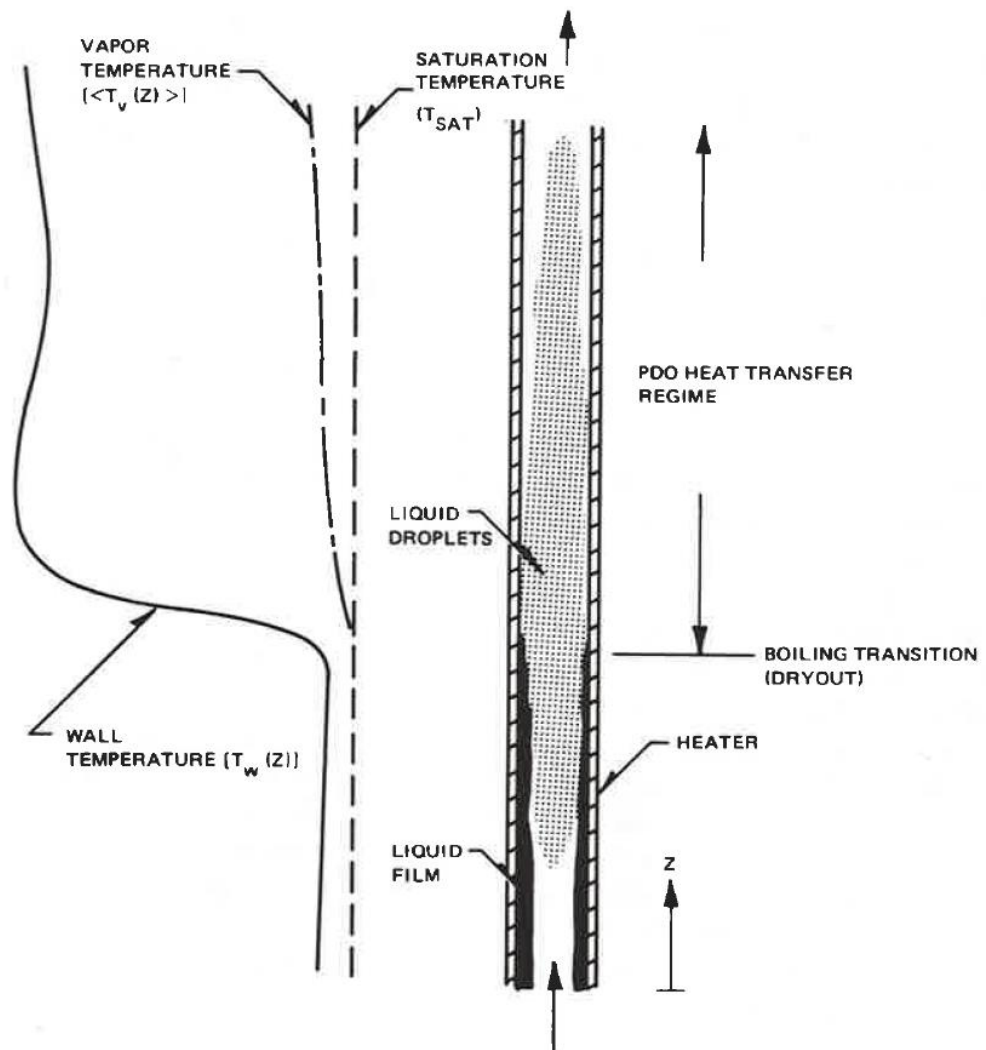
Kuvassa 6 pystyakseli kuvaa polttoainesauvan suojakuoren lämpövuota ja vaak akseli suojakuoren lämpötilaa. Pisteiden A ja B välillä kiehuntaa ei esiinny, vaan lämpö siirtyy jäähdytteeseen täysin konvektiolla. Pisteiden B ja C välillä ollaan kuplakiehunnan (Nucleate boiling) vaiheessa, jolloin lämpövuoto ja lämpötila jatkavat kasvua. Aluksi, oltaessa alle saturaatiolämpötilan, syntyy paikallisia höyrykuplia, jotka sekoittuvat nopeasti virtauksessa pinnalta irrottuaan. Tätä vaihetta kutsutaan alijäähdytyneeksi kuplakiehunnaksi (Local boiling). Lämpötilan ylittäessä saturaatiolämpötilan lisääntyy kuplien määrä jäähdytteessä ja ne eivät enää romahda. Tätä vaihetta kutsutaan kylläiseksi kuplakiehunnaksi (Bulk boiling). (Lamarsh & Baratta, 441–446)

Lämpövuonon noustessa kriittisen lämpövuonon  $q''_c$  tasolle pisteessä C siirrytään osittaisen filmikiehunnan eli siirtymäkiehunnan (Partial film boiling) alueelle, jolloin lämmönsiirto jäähdytteeseen heikkenee ja suojakuoren lämpötila kasvaa. Suojakuoren pinnalla yhdistyvät kuplat muodostavat höyryfilmin. Lämmönsiirto höyryfilmin läpi jäähdytteeseen on

pääasiassa konduktio- ja säteilylämmönsiirtoa, joista molemmat ovat konvektioon verrattuna varsin tehottomia. Suojakuoren lämpötilan ollessa lopulta riittävän suuri saavutetaan piste D, josta alkaen koko suojakuori on höyryfilmin peittämä ja siirrytään filmikiehumman (Full film boiling) alueelle. Pisteestä D käytetään nimitystä Leidenfrost-piste (Incropera, 660). Käyrällä edelleen edettäessä lämpövuoto ja suojakuoren lämpötila jatkavat molemmat kasvamistaan ja lämpötilan noustessa tarpeeksi tulee polttoaineen suojakuori rikkoutumaan. (Lamarsh & Baratta, 446–450)

Lämmönsiirtokriisillä tarkoitetaan tilannetta, jossa kriittinen lämpövuoto saavutetaan. Tällöin jäähdytevirtaus jäähdytekanavassa muuttuu rengasvirtauksesta pisaravirtaukseksi. Tämä tapahtuu kuvan 6 pisteessä C. Tällöin polttoaineen suojakuoren ja jäähdytteen välinen lämmönsiirto heikkenee olennaisesti kahden faasin olosuhteissa. PWR-laitosten yhteydessä lämmönsiirtokriisistä käytetään termiä DNB (Departure from Nucleate Boiling) ja BWR-laitoksilla termiä dryout- eli kuivumisilmiö. (Kalli, 129–131)

Sitä lämpövuon arvoa, jolla lämmönsiirtokriisi syntyy, kutsutaan kriittiseksi lämpövuoksi. Lämmönsiirtokriisi voi aiheuttaa lyhyessäkin ajassa vakavia vaurioita polttoaineelle ja suojakuorelle. (Kalli, 130) Kuvasta 7 ilmenee hyvin dryout-ilmiön aiheuttaman suojakuoren pinnan lämpötilan kasvu rengasvirtauksen loppuessa.



**Kuva 7.** Putkessa virtaavan jäähdytteen siirtyessä rengasvirtauksesta pisaravirtaukseen lämmönsiirto jäähdytteen heikkenee merkittävästi ja seinämän lämpötila ( $T_w$ ) kasvaa. (Lahey & Moody 1993, 158)

## 4 TERMISET MARGINAALIT

Työssä käsiteltävät termiset marginaalit ovat lineaaritehon marginaali ja dryout-ilmiön marginaali, joiden määritelmät, rajat ja riippuvuudet esitellään tässä luvussa.

### 4.1 Suurin sallittu lineaariteho ja lineaaritehon marginaali

Lineaariteholle on asetettu maksimiraja-arvo, jonka ylittäminen ei ole sallittua missään tilanteessa. BWR-polttoaineen lineaaritehon rajaa kutsutaan TMOL-rajaksi (Thermal Mechanical Operating Limit). Tilanteessa, jossa suurin sallittu lineaariteho jostain syystä ylitetään, saattaa fissiokaasuja vapautua voimakkaasti polttoaineen ja suojakuoren väliseen kaasuaukkoon. Fissiokaasut lisäävät suojakuoren rasiutusta, joka voi johtaa suojakuoren rikkoutumiseen ja täten polttoainevuotoon. TMOL-arvo riippuu palaman lisäksi polttoainekohtaisista ominaisuuksista. (Latokartano, 19)

OL1:n ja OL2:n suurin sallittu lineaariteho ei ole kuitenkaan nykyisin rajattu pelkästään lämmönsiirrollisista syistä. Lineaaritehon maksimi-arvo määräytyy pääosin vaatimuksesta pitää sauvan sisäinen paine alle järjestelmäpaineen. (Nuutinen, 2)

FLPD (Fraction of Limiting Power Density) tarkoittaa vallitsevan lineaaritehon ja polttoaineen käyttörajan suhdetta. FLDP on määritelty seuraavasti. (Cacuci, 1267)

$$FLPD = \frac{q'}{q'_{\text{raja}}} \quad (9)$$

, missä

$q'$  on lineaaritehon vallitseva arvo [W/cm]

$q'_{\text{raja}}$  on lineaaritehon sallittu maksimi-arvo [W/cm]

Työssä käytettävällä lineaaritehon marginaalilla eli LHGR-marginaalilla tarkoitetaan seuraavaa

$$LHGR_{\text{marg}} = P_{\text{th}} \cdot \left( \frac{1}{FLPD} - 1 \right) \quad (10)$$

, missä

$P_{th}$  on reaktorin termien teho [%]

## 4.2 Dryout-kertoimen alaraja ja dryout-marginaali

Dryout-kertoimen eli CPR:n (Critical Power Ratio) alaraja riippuu polttoainetyypin ominaisuuksista. OL1/2-laitoksilla CPR-kertoimien laskeminen perustuu polttoainevalmistajien toimittamiin korrelaatioihin. Korrelaatiot on määritelty polttoainetyypikohtaisiin empiirisiin mittauksiin. CPR-kertoimen alaraja määritellään jokaiselle polttoainetyypille erikseen ja raja riippuu pääkiertovirtauksen ja käynnissä olevien pääkiertopumppujen sähkönsyöttöä varmistavien huimamassojen lukumäärästä. Rajat määritellään jaksokohtaisin transientianalysein. (Kumpula, 3)

CPR on kriittisen lämpövuon ja todellisen lämpövuon suhde. Tämä kuvaa sitä, kuinka lähellä lämmönsiirtokriisiä ollaan. Pienimmät dryout-kertoimet esiintyvät luonnollisesti virtauskanavan eli polttoaineniippujen yläpäässä, jossa jäähdytteen aukko-osuus on suurin. CPR on määritelty kriittisen tehon suhteena vallitsevaan tehoon. Kriittisellä teholla tarkoitetaan tehoa, jolla dryout saavutetaan. (Nurminen, 5)

$$CPR = \frac{P_{kriittinen}}{P_{todellinen}} \quad (11)$$

, missä

CPR on dryout-kerroin

TTKE:n mukaan reaktorin dryout-kertoimen on oltava sydämen valvonnassa arvoltaan aina suurempi kuin 1,07. Jos kertoimen arvo alittaa raja-arvon, tulee reaktori ajaa välittömästi kylmään sammutustilaan. Tyypillisesti käyttöraja (pienin sallittu arvo) on  $\geq 1,30$ .

FLCPR (Fraction of Limiting Critical Power Ratio) kuvaa pienimmän sallitun CPR-arvon suhdetta laskettuun CPR-arvoon (Cacuci, 1267).

$$FLCPR = \frac{CPR_{min}}{CPR} \quad (12)$$

, missä

$CPR_{min}$  on pienin sallittu CPR-arvo

CPR-marginaali ilmoittaa marginaalin pienimpään sallittuun CPR-arvoon ja se määritellään seuraavasti.

$$CPR_{\text{marg}} = P_{\text{th}} \cdot \left( \frac{1}{FLCPR} - 1 \right) \quad (13)$$

## 5 REAKTORISYDÄMEN SIMULAATIO

Työssä käytetään reaktorisydämen simulointiin Studsvik Scandpower:n (SSP) Core Management System (CMS) ohjelmistoa. TVO käyttää kyseistä ohjelmistoa myös OL1:n ja OL2:n reaktorien offline-mallinnukseen. CMS soveltuu kiehutus- ja painevesireaktorien offline-sydänsimulointiin ja online-valvontaan. CMS-ohjelmisto koostuu useasta eri ohjelmasta, joista tässä työssä on käytetty Simulate-3:n versiota 6.09.29.

### 5.1 Simulate-3

Simulate-3 on kolmiulotteinen diffuusioteoriaan perustuva kaksiryhmäinen sydänsimulaattori (Studsvik Scandpower, 31). Simulate-3:a käytetään Olkiluodon reaktorien online- ja offline-valvonnassa. Online-laskut suoritetaan 20 minuutin välein laitosten valvomoissa ja tarvittaessa useammin. Simulate-3-lasku suoritetaan valvomon tietokoneella säätösauvaku- vion, tehon tai pääkiertovirtauksen muuttuessa ja vuoronvaihdon yhteydessä. Online-laskun alkuarvojen perusteella saadaan tehojakauma ja termiset marginaalit neutroniikka- mallin avulla ja mittaustuloksiin perustuvat tulokset adaptoidulla mallilla.

Työssä käytetään Simulate-3:n offline-laskentaa. Simulate-3:n lähtötiedoiksi annetaan reaktorisydämen geometria ja tila, polttoaine- ja säätösauvatiedot. Simulate-3 käsittelee reaktorisydäntä polttoainenippukohtaisesti. Aksiaalisesti yksi polttoainenippu on jaettu 25 noodiin ja radiaalisesti yksi noodi sisältää polttoainenipun ja osan ympäröivästä jäähdytteestä ja säätösauvasta sisältävään noodiin. Laskun tuloksista saadaan käsiteltävien termisten marginaalien lisäksi reaktorin tilaa ja tehojakamaa kuvaavia muotokertoimia ja PCI-marginaalit. (Pellet Cladding Interaction) (Tammela, 40)



## 6 UUDEN LASKENTATAVAN KUVAUS

Normaalitilanteissa OL1/2-reaktorien käytön aikaiset termiset marginaalit määritetään CMS-ohjelmistolla valvomon online-koneilla. Tilanteissa, joissa valvomon online-valvonta termisten marginaalien osalta on poissa käytössä, reaktorisydämen käyttöohje ohjeistaa ottamaan yhteyttä reaktori-insinööriin, joka voi työasemallaan suorittaa sydänlaskun. Reaktori-insinöörin suorittama sydänlasku on työssä kehitettävää tapaan nähden tarkempi ja siten ensisijainen menetelmä. Tilanteissa, joissa reaktori-insinööriä ei voida tavoittaa tai reaktori-insinöörin käytössä oleva offline-kone on poissa käytöstä, tulee termisten marginaalien manuaalinen määrittäminen työssä esiteltävällä tavalla ajankohtaiseksi. (Poso, 14)

Uuden laskentatavan pääajatuksena on määrittää termiset marginaalit useissa eri tilanteissa ennen uuden käyttöjakson alkua käyttämällä SSP:n Simulate-3-sydänsimulaattoria offline-tilassa. Lasketuista termisistä marginaaleista tehdään Excel-taulukko, josta kulloisetkin marginaalit lasketaan interpoloimalla. Simulate-3:n laskemat termiset marginaalit yksittäisissä laskentapisteissä ovat hyvin tarkkoja. Jos laskentapisteitä on riittävän tiheässä, pitäisi myös mielivaltaisissa mutta kuitenkin realistisessa pisteessä laskettujen termisten marginaalien olla varsin tarkkoja. Marginaalien määrittäminen käyttötilanteessa nopeutuu huomattavasti suhteessa vanhaan tapaan, sillä kaikki laskut tehdään etukäteen ja tilanteessa, jossa marginaalit tulee määrittää, tehtäväksi jää laskea marginaalien arvot syöttämällä lähtöarvot laskentataulukkoon.

Mallissa oletetaan, että termiset marginaalit riippuvat seuraavista reaktorin tilaa kuvaavista parametreista:

- jakson energia  $E$  [täystehotunteja, EFPH]
- terminen teho  $P$  [MW, %]
- pääkiertovirtaus  $F$  [kg/s, %]
- reaktorin normaalissa säädössä käytettävien säätösauvaryhmien asennot  $CR2, CR4, CR8, CR10, CR24$  ja  $CRO50$  [%]

Termisten marginaalien riippuvuus em. muuttujista voidaan ilmaista muodossa

$$FLDP = FLPD(E, P, F, CR2, CR4, CR8, CR10, CR24, CRO50) \quad (14)$$

$$FLCPR = FLCPR(E, P, F, CR2, CR4, CR8, CR10, CR24, CRO50) \quad (15)$$

Molempien marginaalien riippuvuus yhdeksästä eri muuttujasta tuo omia haasteitaan arvojen interpolointiin. Marginaalien kuvaaminen yhdeksän muuttujan funktioina on virhettä aiheuttava yksinkertaistus, sillä todellisuudessa marginaaleihin vaikuttavia tekijöitä on enemmän. Lisäksi laskentapisteiden rajallinen määrä vaikuttaa tulosten tarkkuuteen. Laskennan tarkkuuteen vaikuttaa myös se, kuinka tarkasti jaksoa on ajettu suhteessa lataussuunnittelun yhteydessä simuloituun jaksoon. Jos jostain syystä ajettaisiin esimerkiksi 3 kuukautta 80 % teholla säätösauvat osittain sisällä, niin palamajakauma muuttuisi merkittävästi, eikä alkuperäisillä taulukoilla interpolointi todennäköisesti toimisi. Kuitenkin poikkeaman ollessa merkittävä voidaan interpolointitaulukot tarvittaessa laskea kesken jakson uudelleen vastaamaan paremmin todellista tilannetta.

## 6.1 Simulate-3:n input-tiedostot

Simulate-3:n tarvitsemat syöttö- eli input-tiedostot sisältävät laskettavien pisteiden lähtötiedot. Input-tiedostojen luomiseksi on kirjoitettu PERL-ohjelmointikielellä skripti, joka kirjoittaa input-tiedoston halutuissa pisteissä vaadittuun muotoon. Skripti on täysin muokattavissa, joten erilaisten laskentapisteiden lisääminen input-tiedostoihin on yksinkertaista.

## 6.2 Laskentapisteiden valinta

Laskentapisteitä voidaan valita varsin vapaasti. Työssä käsiteltäviä muuttujia on kuitenkin yhdeksän, joten laskettavia kombinaatioita on paljon. Simulate-3:lla suoritettava yksi laskentapiste kestää muutaman sekunnin, joten pisteitä ei voida valita rajattomasti, vaan interpoloinnin toimivuuden kannalta tärkeät valinnat tulee määrittää. Esimerkiksi 5000 laskentapisteellä Simulate-3-lasku kestää muutaman tunnin.

### 6.2.1 Jakson energia ja säätösauvasekvenssi

Säätösauva-ajokuvion eli -sekvenssin arvot voivat vaihdella välillä 0–12100 %. Reaktorissa on yhteensä 121 säätösauvaa, jotka on jaoteltu 30:een neljän sauvan ryhmään sekä keskisauvaan, joka muodostaa oman ajoryhmänsä (O50). 0 % tarkoittaa tilannetta, jossa jokainen säätösauva on reaktorissa ja 12100 % tarkoittaa tilannetta, jossa jokainen säätösauva on ulosvedetty.

Käytössä oleva säätösauva-ajokuva vaihtelee jakson energian funktiona ja noudattaa pääpiirteissään lataussuunnittelun yhteydessä generoitua mastersekvenssiä. Usein ollaan tilanteissa, jossa sekvenssi poikkeaa jonkin verran lataussuunnittelun mukaisesta sekvenssistä. Tästä johtuen laskentapisteisiin tulee valita pelkän mastersekvenssin lisäksi myös siitä poikkeavia säätösauvakuvioita.

Työtä varten kokeiltiin useita eri tapoja laskea säätösauvakuvion vaikutusta interpoloinnin onnistumiseen. Aluksi tarkoituksena oli laskea termiset marginaalit säätösauvakuvion noudattaessa täysin mastersekvenssiä, mutta pian selvisi, että tällöin tarkkuus ei ole riittävä. Interpolointia ei voitu suorittaa, kun säätösauvakuvio koostui vain yhdestä täystehotuntia vastaavasta arvosta. Toinen kokeiltu säätösauvakuvion huomiointitapa oli kokeilla laskea säätösauvakuvion arvot 500 tai 1000 % välein, jolloin jokaista täystehotunnin, termisen tehon ja pääkiertovirtauksen kombinaatiota vastaisi 12 tai 24 eri säätösauvakuvioita. Tämä lähestymistapa todettiin myös pian toimimattomaksi, sillä laskentapisteiden lukumäärä kasvaisi aivan liian suureksi. Lisäksi kyseinen tapa ei anna mahdollisuutta kovin tarkkaan interpolointiin. Todellisuudessa mastersekvenssistä poiketaan harvoin 500–1000 %, joten interpoloinnin tarkkuus ei kyseisellä lähtöarvojen valinnalla ollut riittävä.

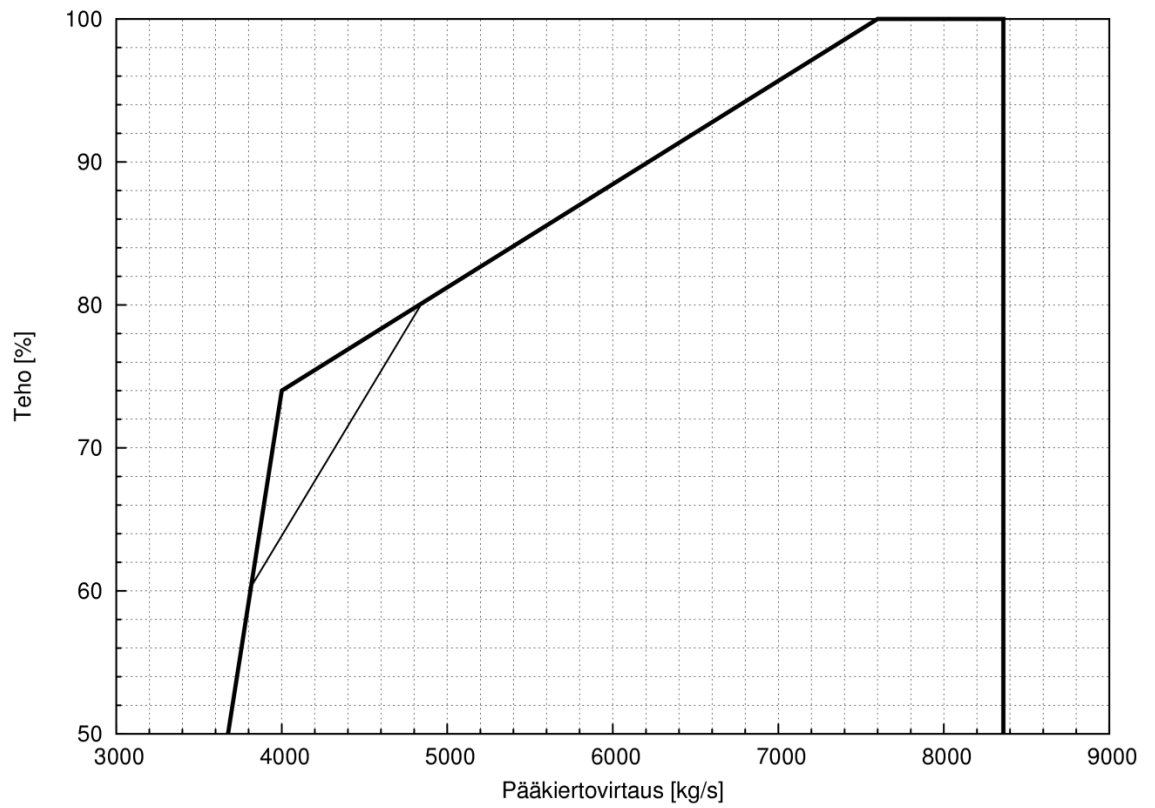
Lopullinen ja tähänastisista paras toteutettu säätösauvakuvioiden valinta on kompromissi. Kaikkia mahdollisia kombinaatioita ei ole mahdollista ottaa mukaan laskentaan, joten laskentaa varten on perusteltua valita vain todennäköisimmät pisteet. Tämä onnistuu perustamalla valittavat säätösauvakuviot lataussuunnittelun mukaiseen mastersekvenssiin ja tekemällä mastersekvenssiin kulloinkin pieniä säätösauva-ajoryhmäkohtaisia muutoksia. Muutokset tehdään ajoryhmittäin säätäviin ajoryhmiin, joita ovat säätösauvaryhmät 2, 4, 8, 10, 24 ja keskisauva O50. Näistä ryhmistä lasketaan jokaiselle mastersekvenssin mukaiset ar-

vot ja  $\pm 10\%$  arvot mastersekvenssistä. Säätosauvan ollessa mastersekvenssin mukaan kokonaan sydämeistä ulosvedettynä tai sisääntyönnettynä otetaan laskentaan mukaan vain kyseinen arvo. Tällä tavalla laskentapisteen määrä pysyy hallinnassa, mutta tilanteet, jossa mastersekvenssistä poiketaan merkittävästi muodostuvat ongelmallisiksi. Odotettavaa on, että menetelmä ei tule toimimaan, jos käytettävä säätosauvakuvio poikkeaa huomattavasti mastersekvenssistä. Huomattava poikkeama on käytännössä tilanne, jossa yksittäisen säätävän ryhmän vetoprosentti poikkeaa mastersekvenssin mukaisesta vetoprosentista selvästi yli  $10\%$ .

Laskettavat täystehotuntien pisteet ovat mastersekvenssin määrittämisessä käytettyjä täystehotuntien arvoja. Esimerkiksi OL1:n käyttöjakso 35 lataussuunnittelussa arvoja on määritetty 33 kappaletta, pääasiassa 500 tai 200 täystehotunnin välein.

### **6.2.2 Reaktorin teho ja pääkiertovirtaus**

Reaktorin tehoa ja pääkiertovirtausta rajaa ajopistekuvio, jonka määräämästä ajoalueesta ei voida poiketa. Ajopistekuvio on esillä kuvassa 8. Laskennasta voidaan haluttaessa karsia ulos ajopistekuvion ulkopuoliset pisteet, joissa marginaalit ovat todennäköisesti voimakkaasti negatiiviset. Tässä tarkastelussa ajopistekuvion ulkopuolisia pisteitä ei ole rajattu laskennan ulkopuolelle.



**Kuva 8.** Reaktorin ajopistekuvio määrää sallitun ajoalueen. (Poso 2007)

Jokaisessa määritellyssä täystehotunnin ja säätösauvakuvion yhdistelmässä lasketaan termisten marginaalien arvot reaktorin tehoilla 50–100 % askeleen ollessa 10 %. Pääkiertovirtaus lasketaan pisteillä 47,8 % ja 60–100 % välillä 10 % askeleella. Lisäksi marginaalit lasketaan pääkiertovirtauksen arvolla 95 %, jotta todennäköisimmällä alueella on laskentapisteitä enemmän.

Alle 50 % tehotasoja ei ole otettu mukaan tarkasteluun, koska laskentapisteiden määrää ei voida kasvattaa menetelmän käytettävyyden kärsimättä ja laitokset käyvät vain harvoin alle 50 % teholla. Reaktorin termisen tehon ollessa alle 50 % tapahtuu myös paljon säätötoimia, joten toimivan interpoloinnin toteutus olisi haastavaa.

## 7 YHDEKSÄNULOTTEINEN INTERPOLOINTI

Tässä luvussa esitellään interpolointi Exceliin tehdyn laskentataulukon avulla.

### 7.1 Interpolointi Microsoft Office Excelillä

Microsoft Office Excelillä interpolointi on toteutettu valmiilla freewarena jaossa olevalla laajennuksella (Excel Add-in). Laajennus käyttää moniulotteisessa interpolaatiossa tavallista Kriging-menetelmää (Ordinary Kriging). Apuohjelman nimi on XonGrid Interpolation Add-in ja se on asennettavissa ilmaiseksi osoitteesta <http://sourceforge.net/projects/xongrid/files/windows/http://xongrid.sourceforge.net/>.

Excel-laajennuksen lähdekoodi on myös vapaasti ladattavissa ja käyttäjän muokattavissa. Muistiota tehdessä on käytetty apuohjelman versiota 1.2b ja Excelin 2007 -versiota. Muiden yhdistelmien toimivuutta ei ole kokeiltu.

#### 7.1.1 Kriging-interpolaatio

Kriging-interpolaatio on interpolaatiomenetelmä, joka toimii parhaiten epätasaisesti jakautuneiden laajojen datakenttien kanssa. Excel-työkirjaan on syötettävä muutamia arvoja, jotka määrittävät käytettävän interpolointitavan. Parhaiksi valinnoiksi osoittautuivat taulukon 1 mukaiset arvot.

**Taulukko 1.** Interpolointivalinnat.

Excel-työkirjan valinta	Arvo
<b>Metodi</b>	1.50
<b>Painotus</b>	1
<b>Laskentapisteiden lukumäärä</b>	Vähintään 250

Interpolointimetodi-valinta voidaan valita väliltä 1–1,99. Suositeltavin arvo on 1,5. Kyseistä lukua käytetään interpolointifunktion sisältämän semivariogrammin potenssina.

Interpolaatio laskee interpoloitavan pisteen arvon painottamalla valittua määrää lähimpiä pisteitä niiden etäisyydellä interpoloitavaan pisteeseen. Excel-työkirjassa tulee aina valita

painotus-kohtaan luku 1. Pisteitä, jotka otetaan huomioon interpoloinnissa, voidaan valita vähintään 10 ja enintään 1024 kappaletta. Yläraja on asetettu, jotta laskenta-aika ei veny liian pitkäksi. Suositeltava valinta laskettavien pisteiden määräksi on vähintään 250.

Excelin ratkaisufunktio ratkaisee tavallista Kriging-menetelmää käyttäen marginaalien arvot sille syötetyssä pisteessä. Interpolointimenetelmää käsitellään seuraavassa alaluvussa ja tulosten tarkkuutta luvussa 8.

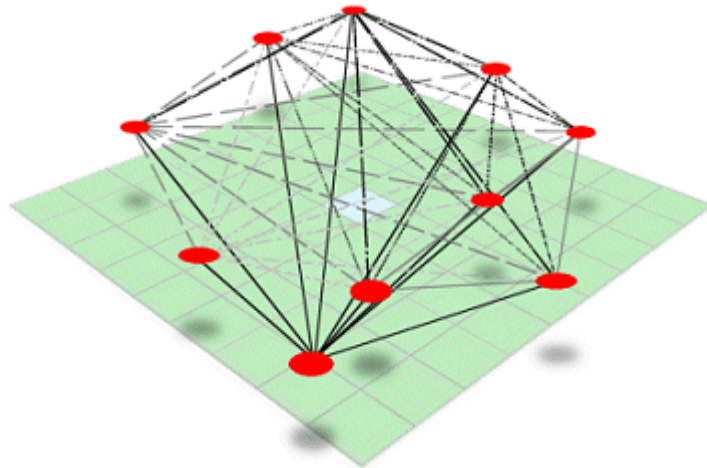
### **7.1.2 Tavallinen Kriging-menetelmä**

Tavallinen Kriging-menetelmä on alkuperäisen idean isän kaivosinsinööri D. G. Krigen mukaan nimetty interpolaatiomenetelmä, joka on kehitetty 1950- ja 1960-luvuilla erityisesti spatiaalisten aineistojen analyysiin. Spatiaalisella aineistolla tarkoitetaan aineistoa, jossa jokaisen pisteen arvo on sidottu määrättyyn paikkaan. Kriging-menetelmän perusajatus on, että analysoimalla ominaisuuksien spatiaalinen vaihtelu, voidaan jokaiselle havaintopisteelle määrätä optimaalinen paino havaintopintaa mallinnettaessa. (Haapanen, 2003)

Tavallisen Kriging-menetelmän spatiaalisen vaihtelun mallinnus perustuu seuraaviin kolmeen komponenttiin.

- Rakenteellinen komponentti, jota kuvataan pysyvällä koko laskenta-alueen keskiarvolla.
- Satunnainen spatiaalisesti korreloitunut komponentti.
- Satunnainen spatiaalisesti korreloimaton komponentti.

Menetelmän käyttäminen alkaa semivariogrammin määrittämisellä. Semivariogrammin avulla selviää kuinka kaukana toisistaan olevat pisteet korreloivat keskenään, eli ovat spatiaalisesti autokorreloituneita. Semivariogrammin määrittämiseksi menetelmä muodostaa jokaisen havaintopisteen välille pisteparit. Kuva 9 on esimerkki Kriging-menetelmän havaintopisteiden välille muodostamista pareista. Havaintopisteiden määrän lisääntyessä lisääntyvät myös suoritettavat laskutoimitukset huomattavasti.



**Kuva 9.** Kriging-menetelmä muodostaa jokaisen havaintopisteen välille havaintopisteparin. (Albrecht)

Malli autokorrelaatiosta saadaan, kun sovitetaan kehitettyyn pisteparveen tasoituskäyrä. Tasoituskäyränä voidaan käyttää monenlaisia funktioita. Tasoituskäyrän jälkeen interpolointimenetelmä muodostaa matriiseja, jotka ovat riippuvaisia spatiaalisesta autokorrelaatiosta ja pisteiden tilajakaumasta. Sovitettua autokorrelaatiomallia käytetään määrittäessä etsintäsäde ja interpoloitavan pisteen naapuripisteiden painotus. Laskettujen painotusten mukaan interpolointimenetelmällä voidaan nyt laskea ennustearvo interpoloitavalle pisteelle. (VirtuaaliAMK, 2003)

Periaatteessa Kriging-menetelmä antaa hyviä tuloksia, mutta aineistosta saatavien tulosten paikkansapitävyyttä on tarkasteltava. Luku 8 keskittyy interpoloinnin tarkkuuden tarkasteluun.

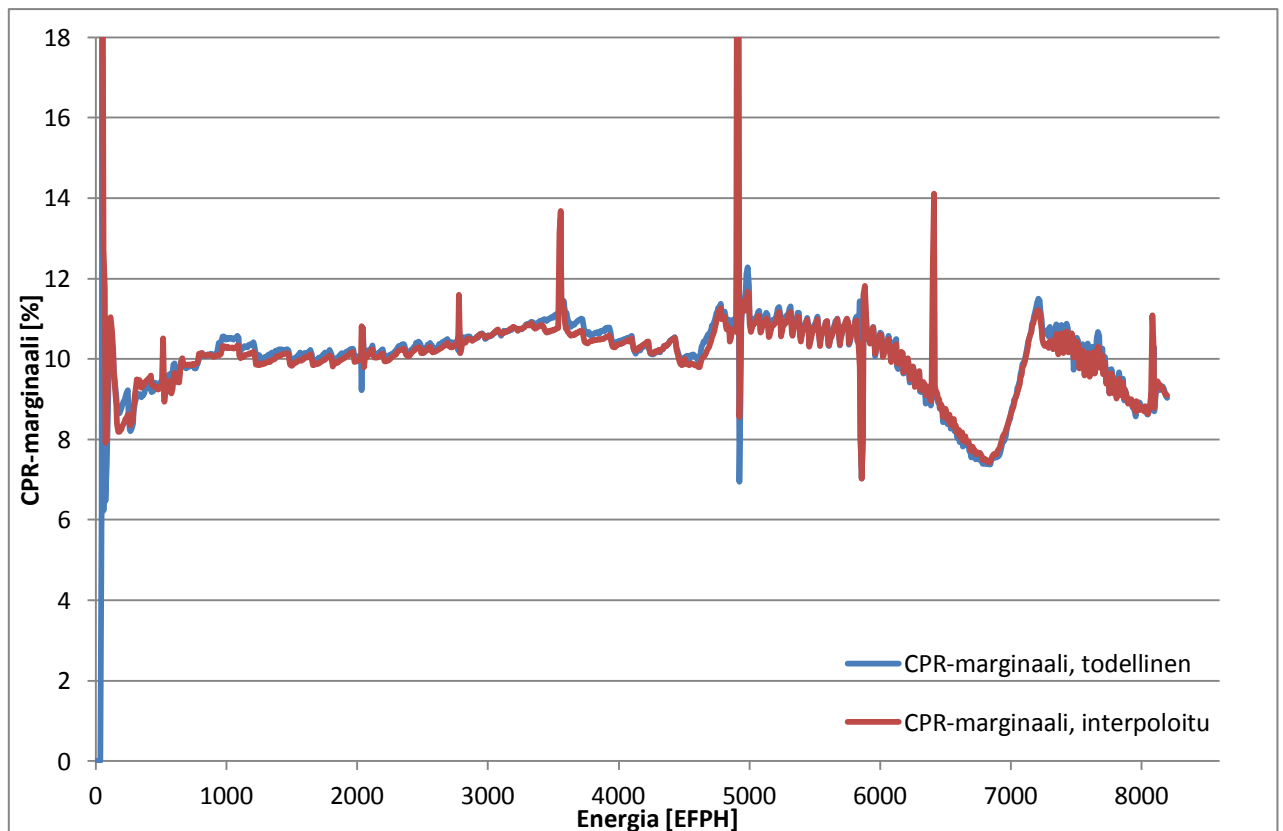


## 8 INTERPOLOINNIN TARKKUUS

Luvussa tarkastellaan Excelillä toteutetun interpoloinnin tarkkuutta vertaamalla interpolointilaajennuksen laskemia arvoja toteutuneisiin OL1-laitoksen 34. käyttöjakson arvoihin. Toteutuneet arvot on haettu voimalaitoksen PMS-järjestelmästä, johon arkistoidaan toteutuneita mittapisteiden arvoja voimalan käyttöjaksoilta.

### 8.1 Tarkkuus koko käyttöjakson aikana

Tarkastelussa laskettiin Simulatella koko 34. käyttöjakson arvot valituissa laskentapisteissä ja verrattiin Simulate-laskuista interpoloituja tuloksia toteutuneiden marginaalien 8 tunnin keskiarvoihin. Negatiivinen virhe tarkoittaa konservatiivista marginaalin arvoa ja positiivinen virhe ei-konservatiivista marginaalin arvoa. Normaalisti LHGR-marginaali on noin käyttöjakson ensimmäiset 5000 tuntia rajoittava marginaali ja CPR-marginaali käyttöjakson loppupään rajoittava marginaali. Kuvassa 10 on vertailu todellisesta ja interpoloidusta CPR-marginaalista OL1:n 34. käyttöjaksolla.

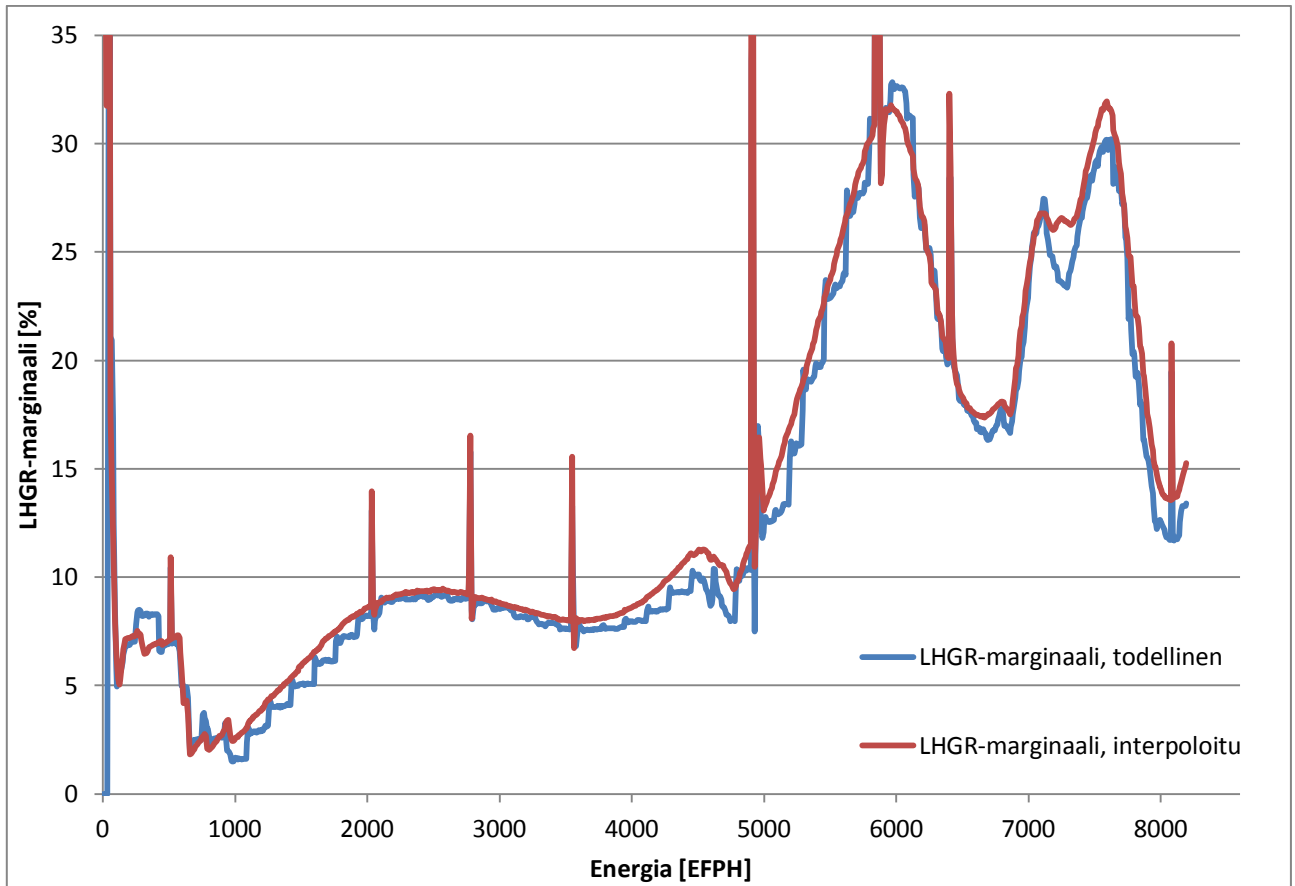


**Kuva 10.** Todellinen ja interpoloitu CPR-marginaali OL1:n 34. käyttöjaksolla.

Kuvaajasta selviää, että marginaalien määrittäminen aivan jakson alkupäässä ei ole tarkkaa. Runsas säätösauvakuvien muutokset ja muut säätötoimenpiteet aiheuttavat laskentaan epätarkkuutta, joka suuntautuu vaihtelevasti konservatiiviseen ja epäkonservatiiviseen suuntaan. Tämä ongelma poistuu kuitenkin nopeasti reaktorin ylösajon jälkeen. Kokonaisuutena CPR-marginaali interpoloituu menetelmällä hyvin. Interpoloidun marginaalin absoluuttinen virhe ei ole missään tilanteessa tasaisella teholla ajettaessa yli 0,5 %. Kuvaajasta erottuvat piikit johtuvat tehonmuutoksista, joissa CPR-marginaali muuttuu nopeasti. Tehonmuutostilanteita käsitellään alaluvussa 8.3. Kokonaisuutena CPR-marginaali interpoloituu toivotun tarkasti.

Jos CPR-marginaali halutaan laskea varmasti konservatiivisesti, voidaan sille asettaa sopiva korjauskerroin. Esimerkiksi kertoimella 0,95 saadaan kaikista tuloksista tasaisella teholla varmasti konservatiivisia.

Vastaava vertailu on tehty myös LHGR-marginaalille. Kuvassa 11 on esitetty todellinen ja interpoloitu LHGR-marginaali 34. käyttöjaksolla.



**Kuva 11.** Todellinen ja interpoloitu LHGR-marginaali OL1:n 34. käyttöjaksolla.

Sinisellä käyrällä kuvattu interpoloitu LHGR-marginaali toteutuu varsin hyvällä tarkkuudella lähes koko jakson ajan. Ensimmäiset 1000 tuntia interpoloitu marginaali on konservatiivinen ja välin 1000–2000 EFPH interpoloitu marginaali on epäkonservatiivinen. Absoluuttinen virhe on tällöin 1 prosenttiyksikön kokoluokkaa. Kyseisellä välillä on ajettu käyttöjakson pienimmillä toteutuneilla LHGR-marginaaleilla ja 1000 täystunnin lähistöllä LHGR-marginaali on todellisuudessa ollut vain noin 1,5 %. Näin pienillä marginaalin arvoilla interpoloinnin tarkkuus on ongelmallista, sillä tulokset eivät ole konservatiivisia. Luvussa 8.2 esitellään LHGR-marginaalille korjauskerroin, joka tähtää pienillä marginaalin arvoilla syntyvien epäkonservatiivisten virheiden poistoon.

Välillä 2000–4000 EFPH laskettu LHGR-marginaali vastaa melko tarkasti pienellä epäkonservatiivisella virheellä toteutunutta marginaalia. Virhe kasvaa 4000 ja 5000 EFPH:n välillä enemmän epäkonservatiiviseksi. Tuolloin yhden säätösauva-ajoryhmän osalta on poikettu suurimmillaan mastersekvenssistä lähes 30 prosenttiyksikköä. Koska säätösauvaa

on vedetty ulos mastersekvenssiä enemmän, on toteutunut LHGR-marginaali laskettua pienempi. Positiivisena huomiona voidaan todeta, että vaikka mastersekvenssiä poiketaan paljon, pääsee interpolointi lähellä oikeaa arvoa. Loppukäyttöjakson ajan LHGR-marginaali ei ole enää rajoittava marginaali sen kasvaessa suureksi. Interpolointi pysyy loppujakson ajan pääosin konservatiivisena.

## 8.2 LHGR-marginaalin korjauskerroin

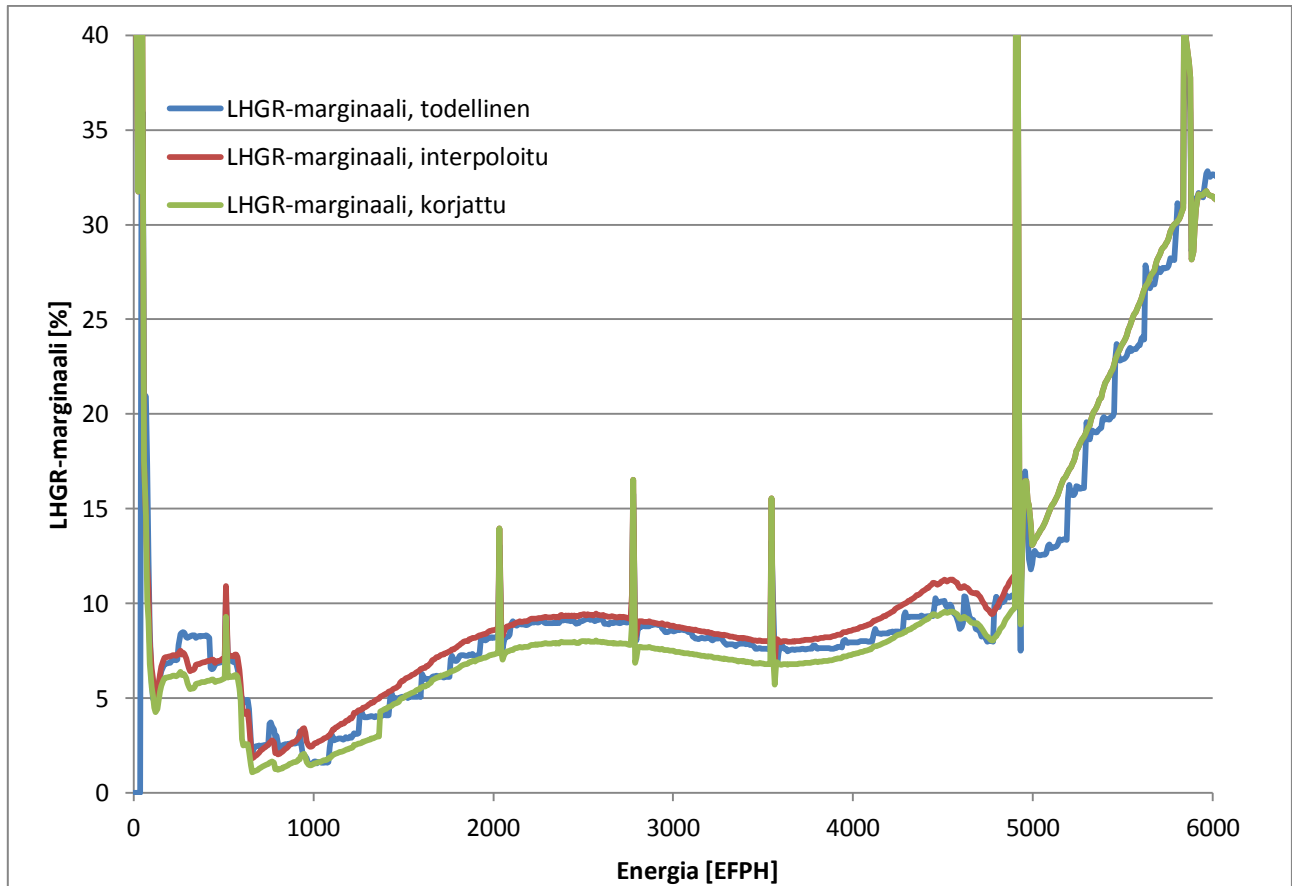
Edellisessä luvussa todettiin lineaaritehon marginaalin saavan interpoloitaessa joillain hetkillä epäkonservatiivisia arvoja. Merkityksellisiä nämä virheet ovat LHGR-marginaalin ollessa rajoittava marginaali. Jos LHGR-marginaalista halutaan interpoloida varmasti konservatiivinen arvo, on mahdollista käyttää korjauskerrointa.

LHGR-marginaalille kokeiltiin kehittää korjauskerroin, jolla varmistetaan interpoloitavan marginaalin konservatiivisuus joka tilanteessa laskennan tarkkuuden liikaa kärsimättä. Parhaaksi tavaksi muodostaa korjauskerroin havaittiin muodostaa korjauskertoimelle riippuvuus interpoloidun LHGR-marginaalin suuruudesta. Muutamien kokeilujen jälkeen toimivaksi korjauskertoimeksi saatiin taulukossa 2 esitellyt arvot.

**Taulukko 2.** LHGR-marginaalin korjauskertoimet.

<b>Interpoloitu LHGR-marginaali</b>	<b>Korjauskerroin</b>
<b><math>LHGR_{\text{marg}} \geq 12 \%</math></b>	1
<b><math>5 \% &lt; LHGR_{\text{marg}} &lt; 12 \%</math></b>	0,85
<b><math>LHGR_{\text{marg}} \leq 5 \%</math></b>	0,60

Kuvassa 12 on esitetty OL1:n 34. käyttöjakson ensimmäisen 5000 täystunnin LHGR-marginaali ja korjattu interpoloitu LHGR-marginaali.



**Kuva 12.** Todellinen ja korjattu LHGR-marginaali OL1:n 34. käyttöjaksolla.

Huomataan korjauskertoimien toimivan hyvin ja epäkonservatiiviset marginaalin interpoloinnit on saatu lähes kokonaan poistettua. Muutamalla hetkellä marginaali interpoloidaan edelleen epäkonservatiivisesti, mutta hyvin pienellä virheellä. Kyseisiä korjauskertoimia kokeiltiin myös 35. käyttöjaksos ensimmäisen noin 2000 täysethotunnin osalta ja korjauskertoimen voitiin todeta toimivan myös toisella käyttöjaksolla.

Jos tuloksista halutaan vielä konservatiivisempia, niin korjauskertoimien jatkokehitys konservatiivisemmiksi on mahdollista. Myös lisäämällä laskentapisteitä ongelma-alueiden lähistölle on tarkkuutta edelleen mahdollista kehittää.

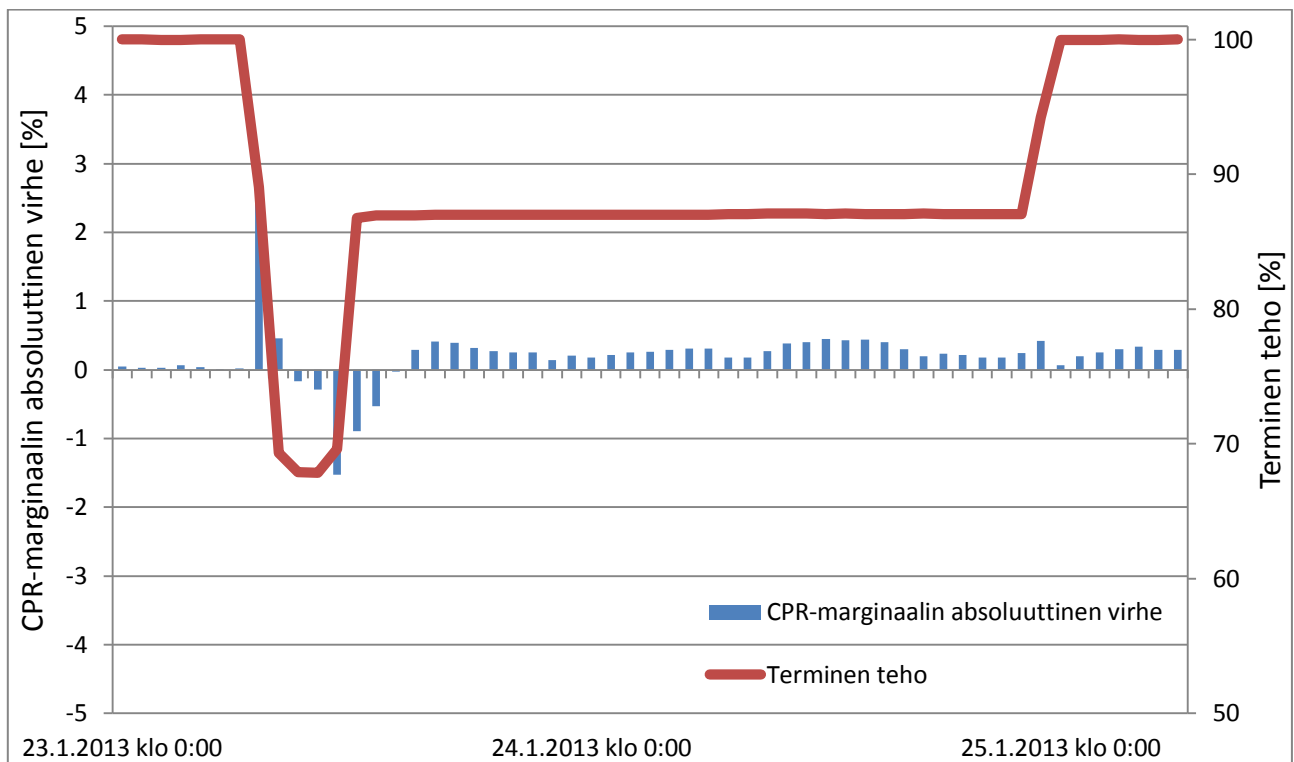
### 8.3 Marginaalit tehonmuutostilanteissa

Tässä luvussa tarkastellaan CPR- ja LHGR-marginaalien interpoloinnin tarkkuutta tehonmuutostilanteissa. Tehonalennuksia tulee käyttöjaksojen aikana aina vastaan vähintään

määräaikaiskokeiden aikana. Muita mahdollisia tehonmuutoksia aiheutuu muun muassa mahdollisesta tehonsäätöajosta. Mahdollisuus tehonsäätöajoon Olkiluodon ydinvoimalaitoksilla on ollut keskustelun alla erityisesti viime vuosina, koska säätövoiman tarve sähköverkossa on lisääntynyt uusiutuvien energialähteiden osuuden kasvaessa.

Interpoloinnin tarkkuutta kokeiltiin 23.–25.1.2013 tapahtuneen määräaikaiskokeen avulla. Käyttöjakson energia oli tällöin noin 5800 EFPH. Tehonalennuksissa polttoaineen lineaariteho laskee termisen tehon laskiessa, joten lineaariteho ei käytännössä koskaan ole rajoitettava tekijä tehoa laskettaessa. CPR-marginaali puolestaan on lähes poikkeuksetta rajoittava ja voi saada hyvinkin pieniä arvoja, mikäli reaktorissa on liian vähän virtausta suhteessa tehoon. Määräaikaiskokeen toteutuneisiin tunnin keskiarvo-marginaaleihin verrataan interpoloitua marginaalia lähtöarvojen tunnin keskiarvoilla.

Kuvassa 13 on sinisillä palkeilla kuvattuna lasketun CPR-marginaalin absoluuttinen virhe toteutuneeseen ja punaisella käyrällä kuvattuna reaktorin terminen teho määräaikaiskokeen aikana. Negatiivinen virheen arvo kuvaa konservatiivista marginaalia.

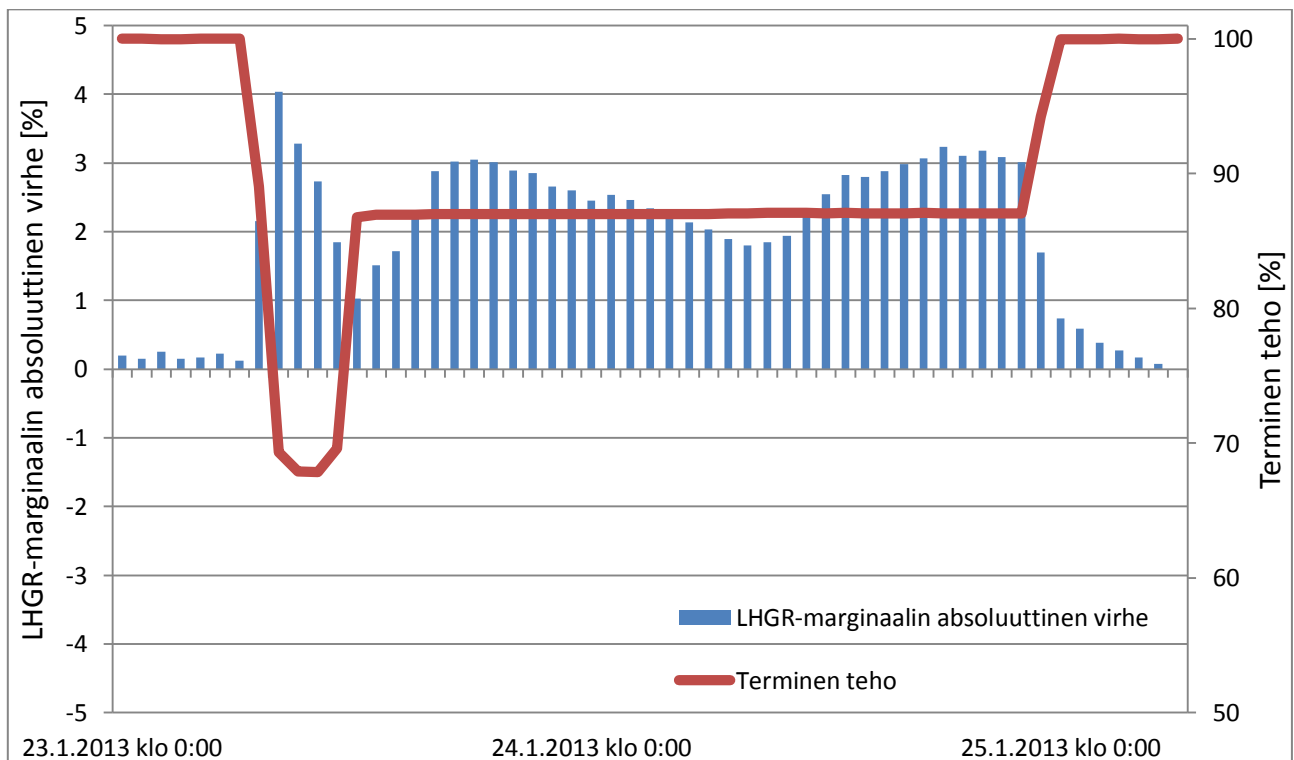


**Kuva 13.** Interpoloinnin absoluuttinen virhe määräaikaiskokeessa.

Määräaikaiskokeessa alennettiin tehoa pääkiertovirtausta vähentämällä kolmeksi tunniksi 67 %:iin, josta teho nostettiin 87 %:iin 35:ksi tunniksi. Tehon nosto toteutettiin pääkiertovirtausta lisäämällä. Lisäksi säätösauvaryhmä 4:ää liikutettiin 6 % sisään 87 %:n tehotason loppupuolella.

Huomataan virheen olevan pääasiassa hieman epäkonservatiivisella puolella. Nopean tehonalennuksen aikana laskettu marginaali osoittaa 2,5 prosenttiyksikön epäkonservatiivista virhettä. Koska kyseisen tunnin lähtöarvojen keskiarvoista interpoloitua marginaalia on verrattu tunnin keskiarvoon, saattaa kyseessä olla huonosti toimiva vertailu. Muuten interpolointi toimii määräaikaiskokeen ajan normaalia vastaavalla tavalla. Virheet ovat alemmallakin tehotasolla alle 0,5 prosenttiyksikköä. Tehonnostotilanteissa virheet kasvavat, mutta ne suuntautuvat konservatiiviseen suuntaan.

Kuvassa 14 on esitetty lineaaritehon marginaalin virheen käyttäytyminen tehonalennuksessa.



**Kuva 14.** LHGR-marginaalin absoluuttinen virhe määräaikaiskokeessa.

Lineaaritehon marginaali ei ole käytännössä koskaan rajoittava marginaali tehon alennuksissa, joten muutaman prosenttiyksikön epäkonservatiivinen virhe ei haittaa. Todelliset marginaalin arvot nousevat määräaikaikokeen aikana noin 40–50 %:iin reaktorin termisen tehon alentuessa ja lineaaritehon vähentyessä.



## 9 YHTEENVETO

Työn tavoitteena ollut uuden termisten marginaalien manuaalisen laskentatavan kehittäminen onnistui ja uuden menetelmän voidaan todeta antavan tarvittavat tulokset hyvällä tarkkuudella. Menetelmä vaatii ennakkovalmisteluja jokaiselle käyttöjaksolle Simulate-3-laskujen ja tulosten Exceliin syöttämisen muodossa, mutta käyttötilanteessa tulokset saadaan huomattavasti aiempaa menetelmää nopeammin. Lisäksi mahdollisia käyttäjän virhelähteitä on paljon aiempaa vähemmän, sillä käyttäjän ainoaksi tehtäväksi jää reaktorin lähtöarvojen syöttäminen laskentataulukoon.

Laskentatapa ja sen vaatimaa ennakkolaskujen määrää on tarvittaessa mahdollista kehittää edelleen ennen sen varsinaista käyttöönottoa muun muassa laskentapisteiden valinnan osalta. Nykyisessä muodossaan ennakkolaskut sekä Excel-laskentataulukon kokoaminen vaativat muutamien tuntien työn ja laskentaa yksinkertaistamalla vaadittua työpanosta voidaan vielä vähentää.

Laskentatapa on rajoittavan marginaalin osalta hyvin tarkka herkkyystarkastelun perusteella pääosan käyttöjaksosta. Interpoloinnin voitiin todeta olevan tarkka, jopa tilanteessa, jossa yhdestä lähtöarvosta oli poikettu 30 prosenttiyksikköä. Kylmän ja sammutetun reaktorin tehonnostoon menetelmä ei sovellu. Tehonnoston vaatimien lukuisten säätösauvaliikuttelujen ja virtauksen muutosten takia laskentapisteiden määrää tulisi kasvattaa todella huomattavasti. Toisaalta menetelmän ei tarvitse toimia reaktorin käynnistämisen yhteydessä, sillä tilanne, jossa reaktori päätettäisiin käynnistää ilman laitostietokoneita tai reaktori-insinöörejä ei ole realistinen.

## VIITTEET

Albrecht Jochen, Hunter College. GTECH 361 lecture 11 – Kriging. Saatavissa: <http://www.geography.hunter.cuny.edu/~jochen/GTECH361/lectures/lecture11/concepts/Kriging.htm> Viitattu: 6.3.2014

Cacuci Dan G. (Toim.). Handbook of Nuclear Engineering, Chapter 10. ISBN: 978-0-387-98149-9. 2010.

Gabriel H., Glück M., AREVA NP GmbH. Prediction of void fraction for PWR and BWR conditions with the sub-channel code F-COBRA-TF, tieteellinen artikkeli, 2011.

Haapanen Reijo, Kriging-menetelmän syntyvaiheet. Spatiaalisen tilastotieteen esitelmä. Metsäntutkimuslaitos. 2003.

Incropera Frank. P., Bergman Theodore L., Lavine Adrienne S., Dewitt David P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Seventh Edition. ISBN: 978-0470-50197-9. 2011.

Kalli Heikki, Ydinreaktorien fysiikka, osa 1. Opetusmoniste, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2012.

Kumpula Jussi, OL1 - Reaktorisydämen valvonnassa sovellettavat termiset rajoitukset 35. käyttöjaksolla. TVO:n sisäinen dokumentti. Olkidoc-tunnus: 145963. 2013.

Kyrki-Rajamäki Riitta, Kevytvesireaktoreiden säätö, nopeat reaktorit ja grafiittihidasteinen kanavareaktori. Opetusmoniste, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2012a.

Kyrki-Rajamäki Riitta, Reaktorimateriaalit ja yleisimmät reaktorityypit. Opetusmoniste, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2012b.

Lahey R.T. Jr. & Moody F.J., The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Reactor - Second edition. ISBN: 0-89448-037-5. 1993.

Lamarsh J. R. & Baratta A. J. Introduction to Nuclear Engineering Third Edition. ISBN: 0-201-82498. 2001.

Latokartano Saku. Kiehutusvesireaktorin lataussuunnitteluohjelma CORFU:n kehittäminen. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu. 1999.

Nurminen T., Simulate - tulosteen lukuohje. Teollisuuden Voima Oyj. TVO:n sisäinen dokumentti, Olkidoc-tunnus: 112113. 2007.

Nuutinen P., PCI-kynnystehon korottaminen liner-polttoaineelle. TVO:n sisäinen dokumentti, Olkidoc-tunnus: 130661. 2009.

Poso Jarmo. Reaktorisydämen käyttöohje osa 3 – reaktorisydämen valvonta. TVO:n sisäinen dokumentti, Olkidoc-tunnus: 108438. 2007.

Studsvik Scandpower, SIMULATE-3 Advanced Three-Dimensional Two-Group Reactor Analysis Code - User's Manual. 2002.

Tammela Mikko. Olkiluoto 1 ja 2 -reaktoreiden vuorokausisäätöön liittyviä tarkasteluja. Diplomityö, Aalto-yliopisto. 2012.

Teollisuuden Voima Oyj. TTKE luku 2. TVO:n sisäinen dokumentti, Olkidoc-tunnus: 101786. 2009.

Teollisuuden Voima Oyj. OL1 & OL2 Ydinvoimalaitosyksiköt. 2013.

Teollisuuden Voima Oyj. Ydinvoimalaitosyksiköt Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2. Saatavissa: [http://tvo.fi/uploads/File/yksikot-OL1-OL2\(1\).pdf](http://tvo.fi/uploads/File/yksikot-OL1-OL2(1).pdf) 2007.

VirtuaaliAMK. Paikkatietojärjestelmien perusteet 3.5.3. Kriging. Saatavissa: <http://kronos.ncp.fi/koulutusohjelmat/metsa/PaikkatietoWWW/Analyysi/Kriging.htm>  
Viitattu: 6.3.2014