

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

STABIILISUUS OLKILUOTO 2 LAITOSYKSIKÖLLÄ
KÄYTTÖJAKSOLLA 30
STABILITY ON OLKILUOTO 2 PLANT UNIT ON CYCLE 30

Lappeenrannassa 8.9.2010

0326437 Päivi Rintala

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENTEET JA MERKINNÄT.....	2
1 JOHDANTO	4
1.1 Olkiluodon kiehutusvesireaktoreiden kuvaus	4
1.2 Työn tausta ja tavoitteet	6
2 KIEHUTUSVESIREAKTORIN STABIILISUUS.....	7
2.1 Globaali epästabiilisuus	8
2.2 Alueellinen epästabiilisuus	9
2.3 Lokaali epästabiilisuus.....	10
2.4 Stabiilisuuteen vaikuttavat parametrit	11
2.5 Vaimenemistekijä	12
2.6 Kohinamittaukset	13
2.7 SIMULATE-3 JA SIMULATE-3K	15
2.7.1 Stabiilisuusindeksit	17
2.7.2 Neutroniikkamalli	17
2.7.3 Hydrauliiikkamalli	18
2.7.4 Stabiilisuuslaskenta SIMULATE-3K:ssa	18
3 STABIILISUUS KÄYTTÖJAKSOLLA 30.....	19
3.1 Lähtötilanne	19
3.2 Tarkastellut tapaukset	23
3.3 Vaimenemistekijän laskeminen	24
4 TULOSTEN TARKASTELU.....	25
5 YHTEENVETO.....	30
LÄHTEET	32
LIITTEET	

Liite 1. OL2 Vaimenemistekijät

Liite 2. Aksiaaliset tehojakaumat ja säätösauvakuviot

LYHENTEET JA MERKINNÄT

APRM	Average Power Range Monitoring, tehoalueen keskiarvovalvonta
a	amplitudi [-]
CMS	Core Management System
CPR	Critical Power Ratio
D	diffuusiokerroin [cm]
DR	Decay Ratio, vaimenemistekijä [-]
EFPH	Effective Full-Power Hour, täystehotunti
ER	Effekt Reglering, tehosäätö
FAX	aksaalinen muotokerroin [-]
FRAD	radiaalinen muotokerroin [-]
f	taajuus [Hz]
k	kasvutekijä [-]
LPRM	Local Power Range Monitoring, paikallinen tehoalueen valvonta
OL2	Olkiluoto 2
PPF	Power Peaking Factor, noodimuotokerroin [-]
PRM	Power Range Monitoring
TVO	Teollisuuden Voima Oyj
VR	Varvtal Reglering, kierroslukusäätö
Σ	makroskooppinen vaikutusala [1/cm]

Φ	neutronivuo [$1/\text{cm}^2\text{s}$]
ν	fissiossa syntyvien neutronien lukumäärä
χ_g	ryhmän g osuus emittoituvista fissioneutroneista

Alaindeksit

eff	äärellinen reaktori
f	fissio
g	neutroniryhmä
g'	neutroniryhmä
s	sironta
t	kokonais-

1 JOHDANTO

Ydinvoimalaitosten suunnittelun ja toiminnan alkua ajoilta asti on otettu huomioon reaktorisydämen mahdollisuus joutua epästabiliin tilaan. Ensimmäiset kiehutusvesireaktorit suunniteltiin riittävin turvamarginaalein, jolloin voitiin olla varmoja, että reaktorisydän pysyy stabiilina. Epästabiilisuusilmiöt olivat hyvin harvinaisia kiehutusvesireaktoreilla 1980-luvulle saakka. Polttoainepun rakenne on kuitenkin kehittynyt ja sydäntä ajetaan suuremmilla tehotasoilla, minkä seurauksena epästabiilisuusilmiöitä on 1980-luvulta alkaen esiintynyt useammin.

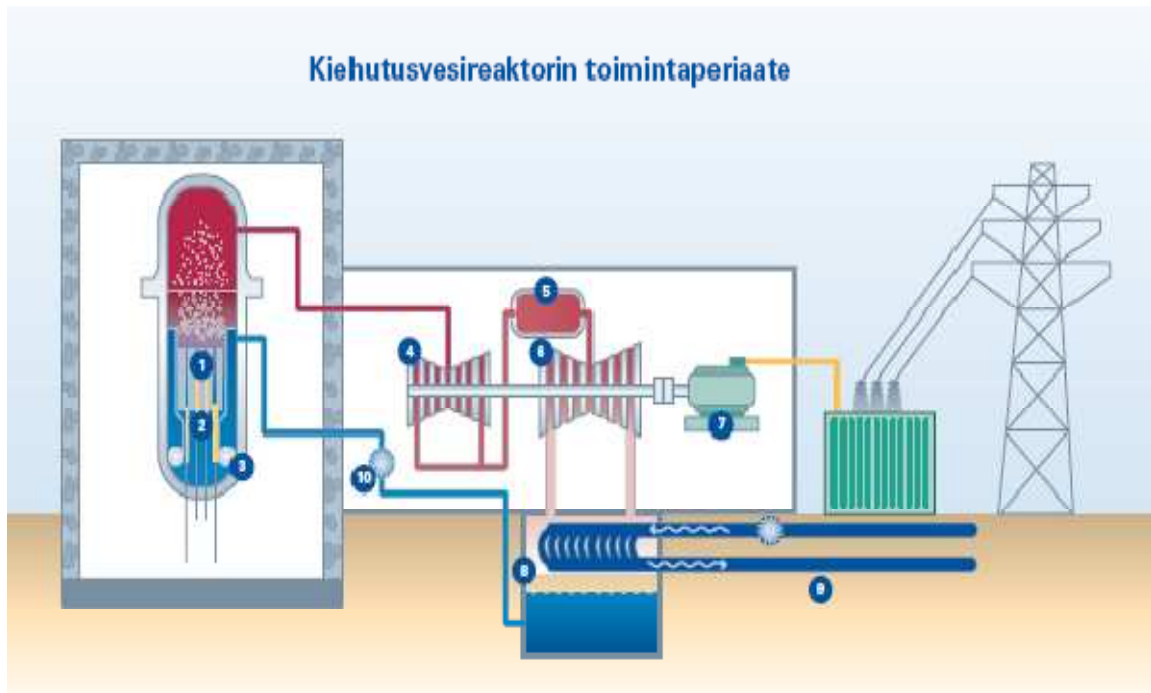
Reaktorisydämen ollessa epästabiilissa tilassa esiintyy tehovärähtelyitä, jotka vaikeuttavat ketjureaktion hallintaa. Pahimmassa tapauksessa tehovärähtelyt voivat aiheuttaa polttoainevaurioita, minkä vuoksi reaktorisydämen joutumista epästabiliin tilaan pyritään välttämään. Jo suunnitteluvaiheessa pyritään takaamaan reaktorisydämen stabiili käyttö.

1.1 Olkiluodon kiehutusvesireaktoreiden kuvaus

Olkiluodossa sijaitsevat Teollisuuden Voima Oyj:n (TVO) kaksi ydinvoimalaitosyksikköä Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 ovat identtisiä kiehutusvesireaktoreita. Ne ovat ruotsalaisen AB Asea Atomin (nykyisin Westinghouse Atom AB) toimittamia. Kummankin laitoksen nettosähköteho on 860 MW ja reaktorin lämpöteho on 2500 MW. (TVO 2007, 4.)

Kiehutusvesilaitoksen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 1. Kiehutusvesilaitoksen keskeisimmät komponentit ovat reaktori, turbiini, generaattori ja lauhdutin. Reaktorin tärkeimmät osat ovat paineastian sisällä oleva reaktorisydän, säätösauvat, höyrynerotin ja -kuivain sekä pääkiertopumput.

Polttoaineena käytetään uraanidioksidia UO_2 , jossa fissiilin U-235 osuus on 3-4 %. Polttoaine on sintrattu pieniksi polttoainetableteiksi, joista on koottu polttoainesauvoja sijoittamalla tabletit zirkonium-seoksesta valmistetun putken sisään. Sauvoista on koottu 10x10-sauvahilaan asetettuja polttoaine-elementtejä. Olkiluodon ydinvoimalaitosten reaktorisydämissä on 500 polttoaine-elementtiä. Polttoaine-elementit sijaitsevat polttoainekanavissa, jotka ohjaavat jäähdytevirtauksen polttoainesauvojen ympärille.



Kuva 1. Kiehutusvesilaitoksen toimintaperiaate. Kuvassa numeroituna (1) polttoainesauvat, (2) säätösauvat, (3) pääkiertopumput, (4) korkeapaineturbiini, (5) välitulistimet, (6) matalapaineturbiini, (7) generaattori, (8) lauhdutin, (9) merivesi ja (10) syöttövesipumput. (TVO 2007, 5)

Polttoaineput on jaettu neljän nipun ryhmiin, joita kutsutaan supercelleiksi. Supercellin keskellä sijaitsee ristinmuotoinen säätösauva, jolla voidaan säätää tehoa. Reaktorissa on yhteensä 121 säätösauvaa, jotka sijaitsevat reaktorisydämen alapuolella. Säätösauvassa on teräskuoren sisällä neutroneja absorboivaa materiaalia boorikarbidia (B_4C). Säätösauvat jaetaan säätö- ja pikasulkuryhmiin. Pikasulkuryhmiä käytetään reaktoria sammutettaessa ja säätöryhmillä säädetään reaktorin tehoa ja reaktiivisuutta.

Reaktoripaineastian sisäistä vesikiertoa kutsutaan pääkiertovirtaukseksi. Vesi tulee reaktoriin reaktorin keskivaiheilta, josta se kierrätetään rengastilan kautta alas reaktoripaineastian alastulotilaan. Vesi virtaa edelleen ylös sydämen läpi, jolloin se jäähdyyttää sydäntä ja samalla osa vedestä höyrystyy. Höyrystymätön osa kulkeutuu takaisin reaktorin alaosaan. Höyrystynyt osa ohjataan paineastian yläosaan höyrynerottimelle ja –kuivaimelle.

Höyrynkuvaimen jälkeen höyry johdetaan päähöyryputkia pitkin ensin korkeapaineturbiinille ja sen jälkeen välitulistimien kautta matalapaineturbiineille. Turbiineissa laajeneva höyry pakottaa turbiinin pyörimään ja pyörittää samalla akselilla

olevaa generaattoria. Generaattorissa muutetaan turbiinin liike-energia sähköenergiaksi, minkä jälkeen syntynyt sähkö syötetään valtakunnan verkkoon.

Matalapaineturbiinien jälkeen höyry johdetaan lauhduttimeen, jossa se lauhdutetaan meriveden avulla takaisin vedeksi. Tämän jälkeen lauhdevesi ohjataan esilämmittimien kautta syöttövesipumpulla takaisin reaktoriin, ja kierto alkaa alusta.

Reaktorin tehon säätämiseen käytetään säätösauvoja, pääkiertovirtausta sekä palavaa absorbaattoria. Osaan polttoainesauvojen polttoainetableteista on lisätty gadoliniumia (Gd_2O_3), jolla sidotaan käyttöjakson aikana reaktorissa olevaa ylijäämäreaktiivisuutta. Tätä polttoaineessa olevaa gadoliniumia kutsutaan palavaksi absorbaattoriksi ja sen määrä vähenee käyttöjakson edetessä. Kun palavan absorbaattorin määrä on vähentynyt tarpeeksi, vedetään säätösauvoja pienissä askeleissa ulospäin, jolloin saadaan vapautettua tehoajossa tarvittavaa reaktiivisuutta. Lisäksi reaktiivisuutta voidaan tarvittaessa säädellä pääkiertovirtauksella, jota muuttamalla voidaan vaikuttaa reaktorisydämen jäähdytteen kiehunnaan. Käyttöjakson lopussa kaikki säätösauvat ovat ulkona reaktorisydäimestä, jolloin pääkiertovirtausta kasvattamalla voidaan vielä jonkin aikaa ylläpitää reaktiivisuutta, kunnes reaktorin teho alkaa hiljalleen laskea. (TVO 2007, 15, 16.)

1.2 Työn tausta ja tavoitteet

Epästabiiliusilmiö on havaittu kaksi kertaa Olkiluoto 1:llä. Ensimmäisellä kerralla vuonna 1987 syöttöveden esilämmittimen vikaantumisen johti sydämen epästabiiliin tilaan. Toisella kerralla vuonna 1990 ilmiö liittyi pääkiertopumppujen manuaaliseen alasajoon. Stabiilisuusominaisuuksiin on alettu käyttökokemusten myötä kiinnittää erityistä huomioita ja reaktorisydämen stabiilille käytölle pyritään luomaan edellytykset jo suunnitteluvaiheessa. (Hämäläinen 2005, 5.)

Sydäimestä suoritettavilla mittauksilla ja laskennalla voidaan valvoa ja määrittää sydämen tila. Olkiluoto 1 ja 2 -laitosyksiköillä sydämen tilan valvontaan käytetään Studsvik Scandpowerin CMS (Core Management System)-ohjelmistoon kuuluvaa SIMULATE-3 simulaattoria. SIMULATE-3:lla saadaan selville muun muassa sydämen tehojakauma ja termiset marginaalit. Stabiilisuutta kuvaavien parametrien laskentaan käytetään myös CMS-ohjelmistoon kuuluvaa SIMULATE-3K:ta.

Tämän työn tavoitteena on tutkia Olkiluoto 2 käyttöjakson 30 (2010–2011) stabiilisuusominaisuuksia käyttäen apuna SIMULATE-3 ja SIMULATE-3K laskentaohjelmia. Ennakkolaskujen perusteella reaktorisydämen stabiilisuus on käytön kannalta rajoittava suure käyttöjaksolla 30. Työssä pohditaan viiden erilaisen tapauksen kautta, kuinka säätösauvojen ajolla ja pääkiertovirtauksen nostolla voidaan vaikuttaa stabiilisuuteen. Työssä mietitään myös, kuinka reaktorin ajaminen eri tavoin vaikuttaa muun muassa käyttöjakson pituuteen.

2 KIEHUTUSVESIREAKTORIN STABIILISUUS

Epästabiilisuusilmiöt olivat hyvin harvinaisia kiehutusvesireaktoreilla 1980-luvulle saakka. Epästabiilisuustapahtumien lisääntymiseen ovat vaikuttaneet muun muassa reaktorin ajaminen suuremmilla tehotasoilla sekä polttoainepun rakenteen kehittyminen. Alkujaan monissa ydinvoimalaitoksissa on käytetty 8 x 8 polttoainehilaa, mutta nykyään käytössä on 10 x 10 polttoainehila, minkä seurauksena sauvat ovat ohuempia. Varsinkin sauvojen ohentumisella on ollut heikentävä vaikutus stabiilisuuteen. Stabiilisuutta ovat kuitenkin parantaneet huomattavasti 1990-luvulla käyttöön otetut osapitkät polttoainesauvat.

Reaktorisydämen joutuessa epästabiiliin tilaan alkaa teho värähdellä. Tehovärähtely voi olla vaimenevaa, voimistuvaa tai teho voi värähdellä vakioamplitudilla. Käyttökokemusten perusteella tehovärähtelyt voivat ilmetä kiehutusvesireaktoreilla taajuuksilla 0,1-1 Hz. Epästabiilisuusilmiön aiheuttaa yleensä ennalta suunnittelematon tilanne kuten pääkiertopumppujen tai esilämmittimien äkillinen alasajo. (Bergdahl et al. 2005, 10–11.) Tavallisesti epästabiilisuusilmiöt ovat esiintyneet, kun teho ja virtaus ovat olleet pieniä. Virtaus on ollut tyypillisesti alle 40 % nimellisarvostaan. Olkiluodon kiehutusvesireaktoreilla stabiilisuus on huonoimmillaan, kun pääkiertovirtaus on 4000 kg/s ja teho 74 % täydestä tehosta.

Kiehutusvesireaktori on epälineaarinen systeemi. Epälineariselle systeemille stabiilisuus muuttuu olosuhteiden tai häiriön myötä. Tällöin siis yksi ajopiste voi olla stabiili, kun taas toinen ajopiste on epästabiili. (Bergdahl et al. 2005, 33.) Epälineaarinen systeemi käyttäytyy lineaarisen systeemin tavoin stabiilin pisteen läheisyydessä (Hämäläinen 2005, 17).

Syntymekanisminsa perusteella epästabiilisuustapahtumat voidaan jakaa kahteen ryhmään. Ensimmäinen ryhmä on pelkästään termohydrauliikasta johtuvat epästabiilisuudet ja toinen ryhmä on sekä neutroniikasta että termohydrauliikasta johtuvat epästabiilisuudet. Sekä neutroniikasta että termohydrauliikasta johtuvia epästabiilisuusilmiöitä ovat globaali epästabiilisuus ja alueellinen epästabiilisuus. Puhtaasti pelkästä termohydrauliikasta tai sekä neutroniikasta että termohydrauliikasta johtuva epästabiilisuusilmiö on lokaali epästabiilisuus. (Bergdahl et al. 2005, 47.)

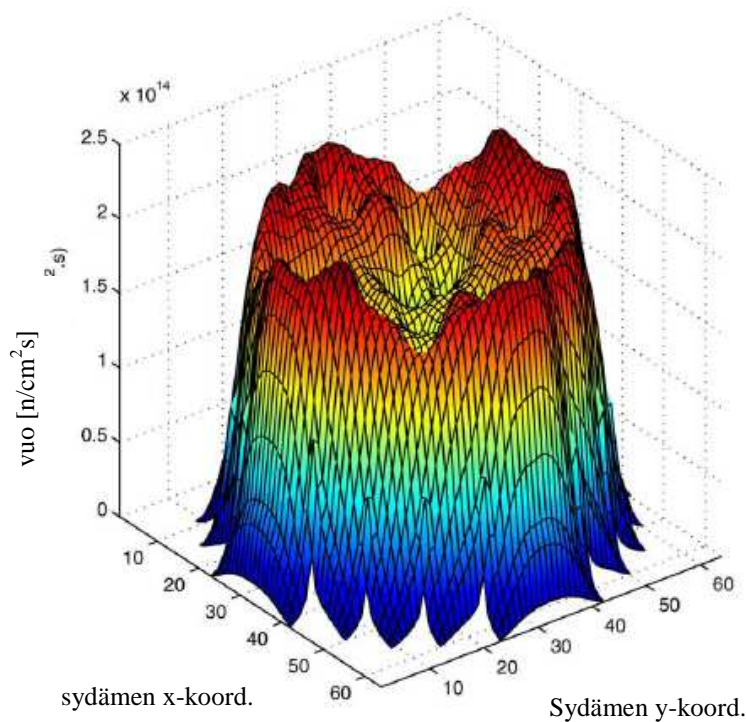
Stabiilisuuteen vaikuttavat monet parametrit. Vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa reaktorin tehojakauma, pääkiertovirtaus sekä jäähdytevirtauksen lämpötila. Tietyillä parametreilla voidaan vaikuttaa termohydrauliikkaan, tietyillä neutroniikkaan ja tietyillä molempiin. Reaktorisydämen stabiilisuus heikkenee tai paranee muuttamalla näitä parametreja.

Reaktorisydämen stabiilisuutta voidaan valvoa sydäimestä tehtävillä kohinamittauksilla. Tavallisesti stabiilisuuden kuvaamiseen kiehutusvesireaktoreilla käytetään vaimenemistekijää (DR). Vaihtoehtoisesti voidaan myös seurata tehovärähtelyjen amplitudin arvoja.

2.1 Globaali epästabiilisuus

Kun koko reaktorisydämen teho värähtelee samassa vaiheessa (engl. "in-phase"), puhutaan globaalista epästabiilisuudesta. Tämän tyyppiset epästabiilisuusilmiöt ovat yleisimpiä ja ne esiintyvät resonanssitaajuuksilla 0,5-0,6 Hz. (Bergdahl et al. 2005, 17, 42.) Kuvassa 2 on esitetty sydän, joka värähtelee globaalisti.

Globaalin epästabiilisuusilmiön voi esimerkiksi aiheuttaa syöttöveden lämpötilan äkillinen lasku. Näin on käynyt Olkiluoto 1:llä vuonna 1987, kun määräaikaiskokeen takia syöttöveden korkeapaine-esilämmitin jäi ohitustilaan ja syöttöveden lämpötila laski äkillisesti 25 astetta. (SOAR on BWRs 1997, 259.)



Kuva 2. Esimerkki globaalista epästabiilisuudesta. (Demazière Christophe, Pázit Imre. 2005, 1315.)

2.2 Alueellinen epästabiilisuus

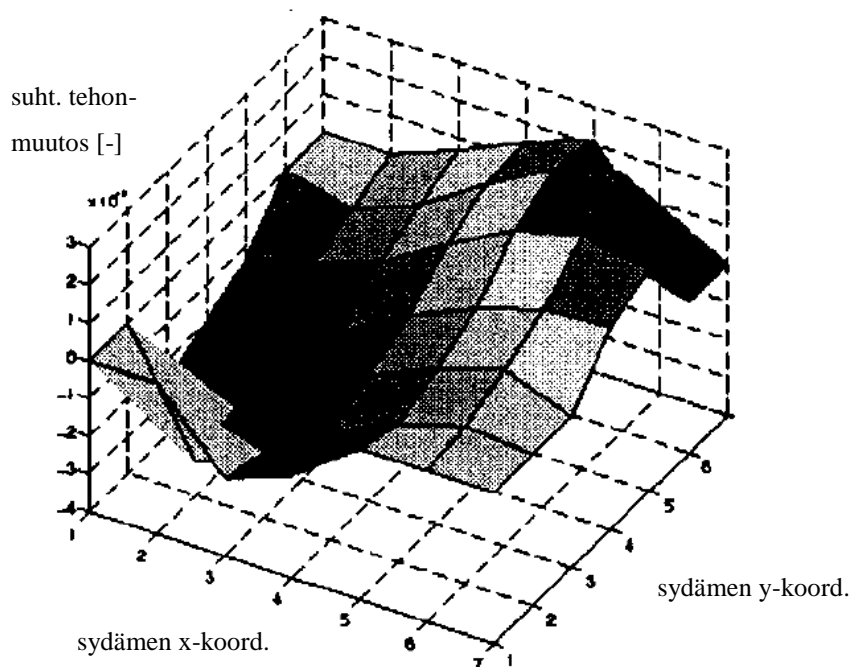
Alueellisessa epästabiiliudessa (eng. "out-of-phase") reaktorisydämen eri osat alkavat värähdellä eri vaiheessa. Tällöin teho kasvaa yhdessä sydämen osassa ja pienenee muualla sydämessä. Alueellinen epästabiilisuus esiintyy noin 0,5 Hz resonanssitaajuudella. (Bergdahl et al. 2005, 19, 43.) Kuvassa 3 on esimerkki sydäimestä, jossa kaksi eri osaa värähtelee vastakkaisessa vaiheessa.

Alueellinen epästabiilisuus on vaikeimmin havaittavissa oleva epästabiilisuusilmiö, joka voi reaktorisydämessä esiintyä. Se on vaikea havaita, sillä kokonaistehon mittaaminen perustuu keskiarvoistettuihin APRM-signaaleihin, jolloin eri vaiheissa olevat tehovärähtelyt voivat kumota toisensa ja tällöin APRM-signaali pysyy vakiona. Alueellisessa epästabiiliusilmiössä on myös mahdollista, että eri vaiheissa oleva alue lähtee kiertämään sydäntä ympäri. (Bergdahl et al. 2005, 19.)

Alueellinen epästabiilisuus ilmenee kaikista todennäköisimmin isoissa kiehtusvesireaktoreissa. Alueelliset epästabiiliusilmiöt eivät ole siis kovin todennäköisiä

Olkiluodon kiehutusvesireaktoreissa, sillä niiden sydämet eivät ole kooltaan kovin suuria. (Hämäläinen 2005, 21.)

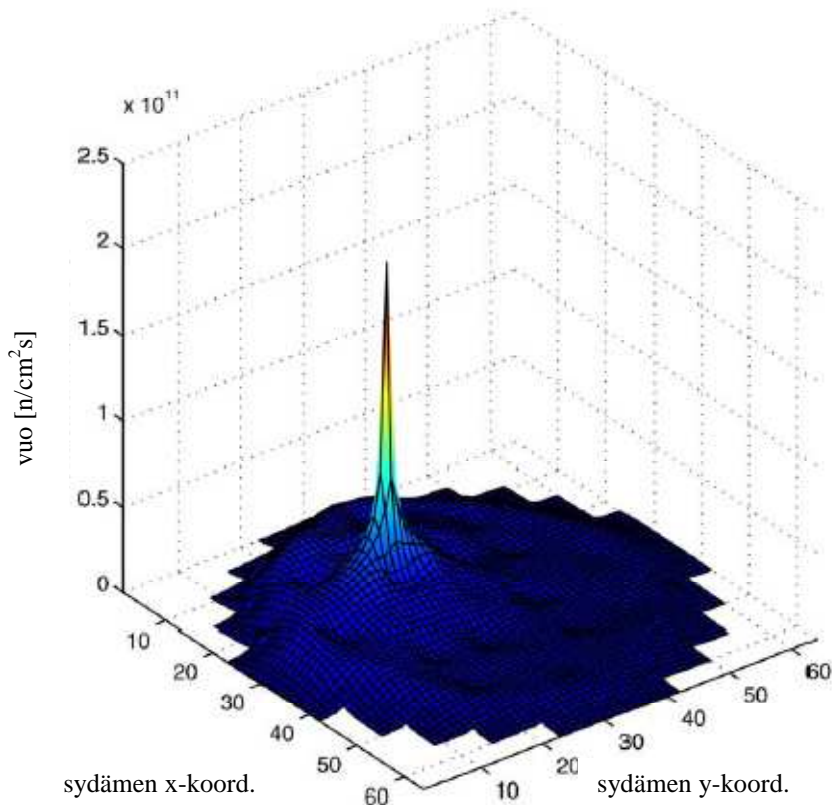
Muun muassa pääkiertopumpun äkillinen sammuminen voi aiheuttaa alueellisen epästabiilisuuden. Esimerkiksi vuonna 1984 General Electricin suunnittelemalla kiehutusvesilaitoksella Caorsossa, Italiassa, pääkiertopumppu pysähtyi yllättäen, mitä seurasi esilämmittimen sammuminen. Kylmä syöttövesi ja piikittynyt aksiaalinen tehojakauma aiheuttivat alueellisen epästabiilisuuden. (SOAR on BWRs 1997, 258.)



Kuva 3. Esimerkki alueellisesta epästabiilisuudesta. (Ginestar et al. 2000, 226)

2.3 Lokaali epästabiilisuus

Erittäin harvinainen epästabiilisuusilmiö on lokaali epästabiilisuus. Lokaalissa epästabiilisuusilmiössä tehovärähtelyjä esiintyy vain yksittäisessä kanavassa. Tavallisesti lokaali epästabiilisuus ilmenee 0,4-0,5 Hz resonanssitaajuuksilla. (Bergdahl et al. 2005, 21, 42.) Kuvassa 3 on havainnollistettu lokaalisti epästabiili sydän.



Kuva 4. Esimerkki lokaalista epästabiilisuudesta. (Demazière Christophe, Pázit Imre. 2005, 1316.)

Lokaali epästabiilisuus voi ilmetä silloin, jos esimerkiksi polttoainenippu ei ole asettunut kunnolla paikoilleen sydämeen. Tällöin jäähdytevirtaus ei jakaudu tasaisesti vaan tavallista suurempi osa kulkee ohivirtauskanavan kautta. Näin on käynyt Olkiluoto 1:llä vuonna 1991. (Bergdahl et al. 2005, 22, 42.)

2.4 Stabiilisuuteen vaikuttavat parametrit

Monilla parametreilla voidaan vaikuttaa reaktorisydämen stabiilisuuteen. Tietyillä parametreilla voidaan vaikuttaa termohydrauliikkaan, tietyillä neutroniikkaan ja tietyillä molempiin. Näitä parametreja muuttamalla voidaan parantaa tai heikentää reaktorisydämen stabiilisuutta.

Ensisijaisesti termohydrauliikasta johtuvaan epästabiilisuuteen vaikuttavia parametreja ovat jäähdytevirtaus, reaktorin paine sekä yksi- ja kaksifaasivirtausten painehäviö. Tavallisesti stabiilisuustapahtumat ilmenevät, kun virtaus on pieni, tyypillisesti alle 40 % nimellisarvostaan. Stabiilisuus paranee, kun jäähdytevirtausta kasvatetaan. Tällöin

polttoaineesta lämpöä vastaanottavaa ja siirtävää jäähdytettä on enemmän saatavilla, minkä seurauksena aukko-osuus pienenee. Kaksifaasivirtauksen (vesi ja vesihöyry) painehäviön kasvaessa stabiilisuus heikkenee, kun taas yksifaasivirtauksen (vesi) painehäviön kasvaessa stabiilisuus paranee. Reaktorin paineen kasvu parantaa stabiilisuutta. Mitä suurempi reaktorin paine on, sitä pienempiä ovat aukko-osuus ja kaksifaasivirtauksen painehäviö. (Bergdahl et al. 2005, 48.) Yksi- ja kaksifaasivirtauksen painehäviöihin voidaan vaikuttaa reaktorisydämen alapäässä tapahtuvalla virtauksen kuristuksella.

Pääasiassa neutroniikasta johtuvaan epästabiilisuuteen vaikuttavia parametreja ovat aukko-kerroin, polttoaineen lämmönjohtavuus sekä polttoaineen lämpötilan reaktiivisuuskerroin. Polttoaineen lämmönjohtavuuden kasvaessa heikkenee myös stabiilisuus. Tavallisesti lämpö siirtyy polttoaineesta suhteellisen hitaasti ja tällöin polttoaine toimii eräänlaisena suodattimena, joka vaimentaa sydämen värähtelytaajuutta. Jos lämmön siirtyminen tapahtuu nopeammin, heikkenee tämä ilmiö. Samoin käy myös, jos polttoainesauvan halkaisijaa pienennetään. Polttoaineen lämpötilan noustessa Doppler-ilmiö vaikuttaa polttoaineen lämpötilan reaktiivisuuskertoimeen siten, että teho lähtee laskuun. Polttoaineen lämpötilan reaktiivisuuskerroin reagoi nopeimmin reaktiivisuusmuutoksiin ja sillä on stabiilisuutta parantava vaikutus. (Bergdahl et al. 2005, 49.)

Sekä termohydrauliikasta että neutroniikasta johtuvaan epästabiilisuusilmiöön vaikuttavia tekijöitä ovat termisen teho, aksiaalinen ja radiaalinen tehojakauma sekä jäähdytevirtaus. Termisen tehon kasvu johtaa aukko-osuuden, kaksifaasivirtauksen painehäviön sekä reaktiivisuuden kasvuun, jolloin myös stabiilisuus heikkenee. Reaktorisydämen stabiilisuus heikkenee myös, jos tehojakauma keskittyy sydämen alaosaan. Tällöin kiehumisen rajapinta siirtyy alemmas, minkä seurauksena aukko-osuus ja kaksifaasivirtauksen painehäviö kasvaa. Jos radiaalinen tehojakauma on hyvin epätasainen, huononee stabiilisuus. Tällöin kaikista epästabiilein kanava pyrkii hallitsemaan koko reaktorisydämen vastetta. (Bergdahl et al. 2005, 49.) (Hämäläinen 2005, 19.)

2.5 Vaimenemistekijä

Tavallisimmin stabiilisuutta kuvataan vaimenemistekijällä (engl. decay ratio). Vaimenemistekijä määritellään kahden peräkkäisen amplitudin suhteena, kun teho

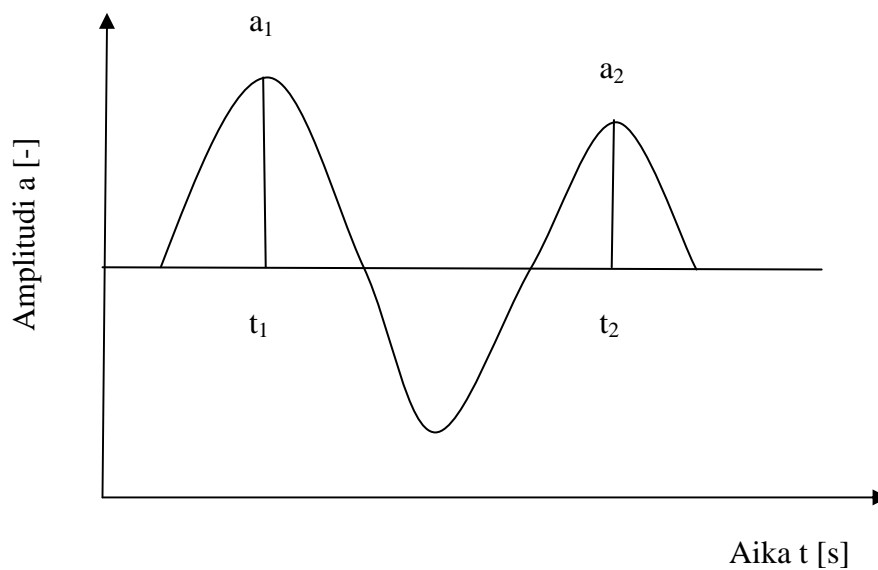
värähtelee. (Bergdahl et al. 2005, 35.) Vaimenemistekijän määrittely on havainnollistettu kuvassa 5.

$$DR = \frac{a_2}{a_1}, \quad (1)$$

DR = vaimenemistekijä [-]

a = amplitudi [-]

Kun systeemi on täysin stabiili eikä värähtele, saa vaimenemistekijä arvon 0. Kun vaimenemistekijä on pienempi kuin yksi, värähtely on vaimenevaa ja järjestelmä on stabiili. Jos vaimenemistekijä on suurempi kuin yksi, värähtely on voimistuvaa ja systeemi on epästabiili. Vaimenemistekijän ollessa yksi värähtelee systeemi vakioamplitudilla. (Bergdahl et al. 2005, 35.)



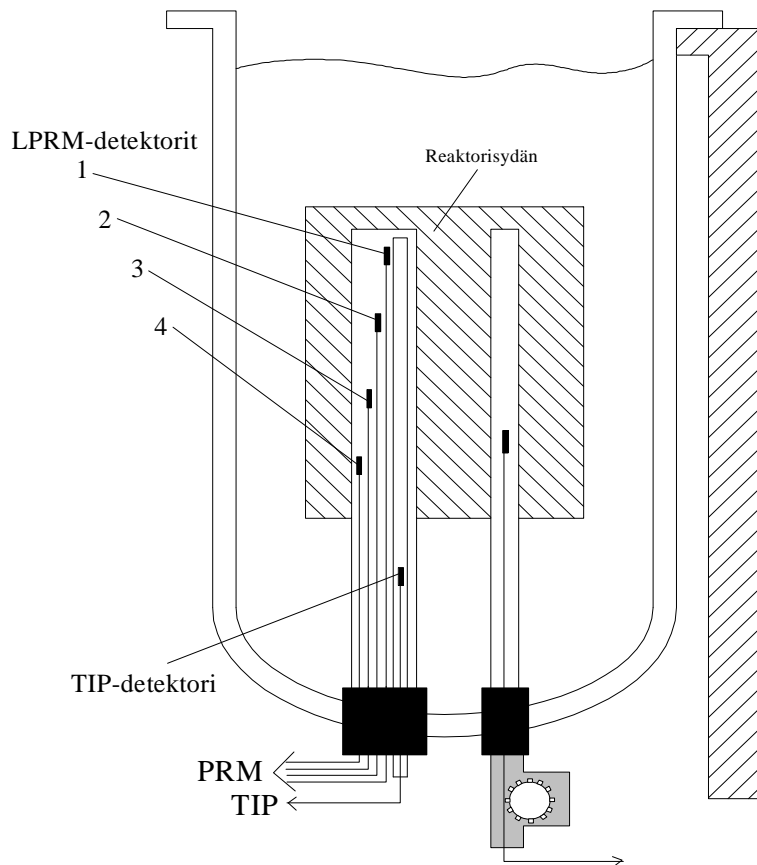
Kuva 5. Vaimenemistekijän määrittely.

2.6 Kohinamittaukset

Reaktorisydämen stabiilisuutta voidaan valvoa sydäimestä tehtävillä neutronivuon mittauksilla. Olkiluodossa mittaukset suoritetaan PRM (Power Range Monitoring)-detektoreilla, joilla mitataan yli 8 %:n tehoa. Neljästä eri korkeudella sydäntä olevasta

LPRM (Local Power Range Monitoring)-detektorista muodostuu aina yksi PRM-sondi, joita on yhteensä 28 sydämessä (kuva 6). Reaktorissa on siis yhteensä 112 LPRM-detektoria. (Niemi 2005, 21–22.) Detektorit on sijoitettu radiaalisesti tasaisesti sydämeen, jolloin tehoa pystytään valvomaan mahdollisimman hyvin (Hämäläinen 2005, 10).

LPRM-detektoreilla mitataan neutronivuota ja ne on jaettu neljään eri ryhmään. Jokainen ryhmä koostuu siis 28 LPRM-detektorista, jotka kattavat koko sydämen alueen. Laskemalla jokaisen ryhmän LPRM-detektorien tehoarvojen keskiarvot saadaan määritettyä kaikki neljä APRM (Average Power Range Monitoring)-signaalien arvoa. LPRM-signaalien avulla pystytään havaitsemaan paikalliset epästabiilisuudet ja APRM-signaalien avulla voidaan havaita globaali epästabiilisuus. (Hämäläinen 2005, 10.)



Kuva 6. PRM-järjestelmä (Niemi 2005, 21.)

Kohinamittauksilla tarkkaillaan säätäjien, prosessien ja reaktorisydämen toimintaa sekä sydämen stabiilisuusominaisuuksia. Kohinamittauksilla valvotaan reaktorin tehon käyttäytymistä ajan myötä ja mittauksia suoritetaan jokaisen käyttöjakson aikana vähintään kaksi. Ensimmäinen mittaus tehdään vaihtolatauksen ensimmäisen tehonnoston

yhteydessä. Toinen mittausta suoritetaan siinä käyttövaiheessa, jossa esiintyy suunnittelun yhteydessä ilmennyt suurin ennustettu vaimenemistekijä. Lisäksi mittauksia voidaan tarvittaessa tehdä käyttöjakson muissa vaiheissa. (Laukkanen ja Nurminen 2009, 2.)

Kohinamittausten näytteenottotaajuutena käytetään 12,5 Hz ja mittausaika on 10 minuuttia. Suodatusta ei käytetä ja mittaustapahtuma ja mittaustulosten analysointi on automatisoitu. (Laukkanen ja Nurminen 2009, 5.) Mittaukset aloitetaan ajamalla pääkiertopumput minimikierröksille, minkä jälkeen odotetaan hetki. Tänä aikana reaktorin tehon annetaan tasoittua noin 70 %:n tehotasolle. Varsinainen mittausta käynnistyy tämän jälkeen. Mittauksen aikana sekä sydämen läpi kulkeva virtaus että teho vaihtelevat hieman. Mittauksen edettyä suunnilleen puoleen väliin käynnistetään sydämen valvontajärjestelmä, joka laskee teoreettiset arvot reaktorin sen hetkiselälle tilalle. Tätä teoreettisesti määritettyä käyttötilaa käytetään myös SIMULATE-3K:lla suoritettavien laskujen käyttötilana. (Hämäläinen 2005, 42.)

2.7 SIMULATE-3 JA SIMULATE-3K

SIMULATE-3 -simulaattoria käytetään Olkiluodon ydinvoimalaitoksilla reaktorisydämen tilan valvontaan. Sen avulla saadaan laskennan kautta tietoa sydämen tilasta, mutta sitä ei käytetä reaktorin ohjaamiseen. SIMULATE-3 hälyttää tarvittaessa ohjaajaa, mutta siltä ei mene signaaleja suoraan suojausjärjestelmille. Simulaattorin avulla voidaan valvoa, että reaktori toimii annettujen termisten turvamarginaalien puitteissa. (Kärkkäinen 2008, 18.)

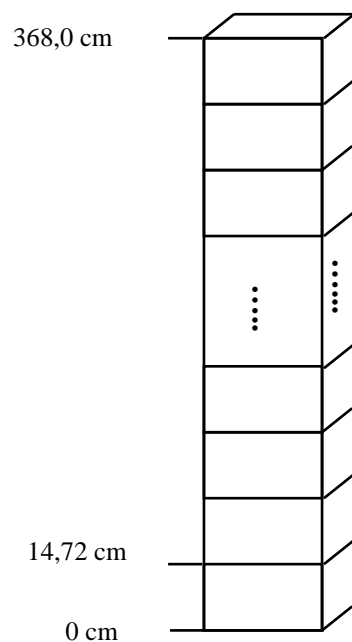
Laskenta on mahdollista jakaa kahteen osaan SIMULATE-3:lla. Ensin lasketaan annettujen alkuarvojen perusteella muun muassa tehojakauma sekä termiset marginaalit neutroniikkamallin avulla. Tämän jälkeen sydäimestä tehtyihin mittauksiin perustuvalla adaptoidulla mallilla korjataan jakaumia ja määritetään termiset marginaalit uudelleen. (Kärkkäinen 2008, 1.)

SIMULATE-3:a käytetään sekä online- että offline-laskentaan. Online-laskenta suoritetaan automaattisesti laitosyksiköiden valvomossa 20 minuutin välein ja sen avulla valvotaan reaktorin tilaa. Tarvittaessa online-laskenta voidaan suorittaa useamminkin. Offline-laskenta suoritetaan tarvittaessa ja sitä käytetään käyttöjakson suunnitteluun. Tässä työssä laskuihin on käytetty offline-laskentaa.

SIMULATE-3K:ta käytetään Olkiluodossa pääasiassa stabiilisuyslaskentaan. Ohjelma on kehitetty kevytvesireaktorien transienttianalyysijä varten. Ohjelman keskeisimmät osat alueet ovat reaktiivisuuslisäystransientit, kiehutusvesireaktorien stabiilisuyslaskenta, paineistustransientit, virtausnopeusmuutoksista johtuvat transientit sekä jäähdytevirtauksen lämpötilasta johtuvat transientit. (Hämäläinen 2005, 23.)

SIMULATE-3K käyttää hyvin pitkälti samoja fysiikkamalleja kuin SIMULATE-3. SIMULATE-3K:n avulla pystytään mallintamaan reaktorisydän hyvin tarkasti, sillä se on kolme dimensioidun malli, joka käsittelee erikseen jokaisen polttoainepinon neutroniikan ja termohydrauliikan. (Borkowski et al. 2007, 1)

Koska olosuhteet ja ominaisuudet muuttuvat merkittävästi liikuttaessa sydämessä, on laskennan helpottamista varten jokainen polttoaine-elementti jaettu aksiaalisuunnassa osiin eli noodeihin. Noodeja on 25 ja jokaisen korkeus on 14,72 cm. Poikkileikkaukseltaan noodi on neliö, jonka sivun pituus on 15,375 cm. Kuvassa 7 on esitelty polttoaine-elementin jako noodeihin. Radiaaliskuunnassa voidaan polttoaine-elementtien välisen rajan ajatella kulkevan niiden välisen tilan puolivälissä, jolloin nooiden väliin ei jää tyhjää tilaa. Nodalisoidussa polttoaine-elementissä otetaan siis huomioon myös virtauskanavan sekä nippujen välisten ohivirtausalueen ominaisuudet. (Hämäläinen 2005, 25.)



Kuva 7. Polttoaine-elementin jako noodeihin.

2.7.1 Stabiilisuusindeksit

Reaktorisydämen stabiilisuuden valvontaan käytetään SIMULATE-3:lla online-laskennasta saatavia niin sanottuja stabiilisuusindeksejä. Stabiilisuusindeksit ovat sydämen tehojakaumaa kuvaavia muotokertoimia, joiden avulla pystytään stabiilisuuden kannalta epäsuotuisat olosuhteet huomaamaan. Stabiilisuusindeksien raja-arvot perustuvat kokemukseen, eikä niiden ylittyminen aiheuta suoria seurauksia. (Nurminen 2007, 8.)

Stabiilisuusindeksejä on käytössä kolme eri suuretta, jotka ovat noodimuotokerroin (Power Peaking Factor, PPF), aksiaalinen muotokerroin (FAX) ja radiaalinen muotokerroin (FRAD). Noodimuotokerroin määritellään

$$PPF = \frac{\text{Korkein nooditeho yksittäisessä nipussa}}{\text{Sydämen keskimääräinen nooditeho}} \quad (2)$$

Noodimuotokertoimen suurin sallittu arvo on 2,7. Aksiaalinen muotokertoimen määritelmä on

$$FAX = \frac{\text{Korkein keskimääräinen nooditeho yksittäisellä nooditasolla}}{\text{Sydämen keskimääräinen nooditeho}} \quad (3)$$

Suurin sallittu arvo aksiaaliselle muotokertoimelle on 1,6. Radiaalinen muotokerroin määritellään

$$FRAD = \frac{\text{Korkein nipputeho}}{\text{Sydämen keskimääräinen nipputeho}} \quad (4)$$

Radiaaliselle muotokertoimelle ei ole määritelty suurinta sallittua arvoa. (Nurminen 2007, 8.)

2.7.2 Neutroniikkamalli

SIMULATE-3K mallintaa neutronien käyttäytymistä kolmidimensionaalisella, kaksiryhmäisellä diffuusioyhtälöllä. Tuloksista saadaan riittävän tarkkoja, kun neutronit jaetaan kahteen ryhmään, nopeisiin ja termisiin neutroneihin. Neutroniikkamallilla kuvataan reaktorin neutronitaloutta ja siinä huomioidaan syntyvät ja häviävät neutronit. Neutroneja syntyy fissioissa sekä mahdollisten muiden ulkopuolisten neutronilähteiden kautta. Neutroneja absorboituu eri aineisiin ja vuotaa ulos reaktorista, mikä vähentää

neutronien määrää reaktorissa. Kaksiryhmäinen ($g=1,2$) diffuusioyhtälö stationääritilalle voidaan esittää (Stacey 2007, 128)

$$\begin{aligned}
 & -\nabla \cdot D_g(r) \nabla \Phi_g(r) + \Sigma_r^g(r) \Phi_g(r) \\
 & = \sum_{g' \neq g}^G \Sigma_s^{g' \rightarrow g}(r) \phi_{g'}(r) + \frac{1}{k_{eff}} \chi_g \sum_{g'=1}^G v \Sigma_f^{g'}(r) \phi_{g'}(r)
 \end{aligned} \tag{5}$$

D_g = ryhmän g diffuusiokerroin [cm]

Φ_g = ryhmän g neutronivuo [$1/\text{cm}^2\text{s}$]

Σ_r^g = ryhmän g makroskooppinen kokonaisvaikutusala [1/cm]

$\Sigma_s^{g' \rightarrow g}$ = ryhmästä g' ryhmään g siroavien neutronien makroskooppinen vaikutusala [1/cm]

k_{eff} = äärellisen reaktorin kasvutekijä [-]

χ_g = ryhmän g osuus emittoituvista fissioneutroneista [-]

v = fissiossa syntyvien neutronien lukumäärä [-]

$\Sigma_r^{g'}$ = ryhmän g' makroskooppinen fissiovaikutusala [1/cm]

$\Phi_{g'}$ = ryhmän g' neutronivuo [$1/\text{cm}^2\text{s}$]

2.7.3 Hydraulikkamalli

SIMULATE-3K:ssa sydän on mallinnettu niin, että jokaista polttoaine-elementtiä vastaa yksi termohydraulinen kanava. Koska polttoaine-elementit ovat koteloituja, virtaus ei sekoitu kanavien välillä. Kiehumusvesireaktoreissa on kaksifaasivirtausta, joka on veden ja vesihöyryn seos. SIMULATE-3K:ssa on erikseen esitetty kummallekin faasille massan, energian ja liikemäärän säilymisyhtälöt. Termohydrauliikan kuvaamiseen käytetään siis kuutta yhtälöä.

2.7.4 Stabiilisuuskalkenta SIMULATE-3K:ssa

Stabiilisuusanalyysia varten on teho saatava värähtelemään sydämessä. Laskettaessa reaktorin stabiilisuutta SIMULATE-3K:lla aiheutetaan reaktorin stationääritilaan häiriö,

jonka jälkeen seurataan reaktorin tehon käyttäytymistä. Sydämen käyttötilan täytyy olla sellainen, että teho on mahdollista saada värähtelemään. Värähtelyjä ei juurikaan saada aikaan esimerkiksi täydellä teholla virtauksen ollessa lähellä nimellistä maksimiaan. (Hämäläinen 2005, 39, 55.)

Tehovärähtelyt saadaan aikaan aiheuttamalla painepiikki. Tämä on mahdollista sulkemalla ja avaamalla höyrylinjassa olevia venttiilejä, mikä aiheuttaa edestakaisin kulkevia paineaaltoja. Jos paineaallot ovat tarpeeksi voimakkaita, ne kulkeutuvat sydämeen asti. Paineen kasvu sydämessä aiheuttaa aukko-osuuden pienenemisen. Tällöin myös reaktiivisuus kasvaa, sillä neutroneja moderoivaa jäähdytettä on saatavilla enemmän. Reaktiivisuuden kasvaessa myös teho kääntyy kasvuun. (Hämäläinen 2005, 38.)

Tehovärähtelyt ilmenevät heti painehäiriön sattuessa. Kun halutaan tarkastella globaalia epästabiilisuusiilmiötä, tehon annetaan värähdellä 15 sekunnin ajan. Tämä aika on riittävä tehovärähtelyjen syntymiseen ja kehittymiseen. Kun tehovärähtelyt on aiheutettu, määritetään värähtelevästä signaalista vaimenemistekijä ja resonanssitaajuus. Jotta alkuvärähtelyn häiriöt eivät vaikuttaisi tuloksiin, määrittäminen toteutetaan noin viiden sekunnin jälkeisistä värähtelyistä. (Hämäläinen 2005, 39, 55.)

3 STABIILISUUS KÄYTTÖJAKSOLLA 30

3.1 Lähtötilanne

Reaktorisydämen stabiili käyttö varmistetaan jo suunnitteluvaiheessa. Kun tulevaa käyttöjaksoa suunnitellaan, huolehditaan säätösauvojen ajolla, polttoainedesignilla sekä jäähdytevirtauksella, että vaimenemistekijä pysyy tarpeeksi alhaisena koko jakson ajan. Säteilyturvakeskus on aikaisempien mittausten perusteella määritellyt vaimenemistekijälle rajaksi 0,80, mutta TVO käyttää vaimenemistekijälle suunnittelurajana 0,70 taatakseen riittävät turvamarginaalit.

OL2 reaktorille suoritettujen ennakkolaskujen perusteella stabiilisuus on käyttöjaksolla 30 (2010–2011) rajoittava suure käytön kannalta. Tässä työssä selvitetään, voidaanko OL2 reaktoria ajaa pitämällä jäähdytevirtaus vakiona käyttöjakson ajan tai ilman niin sanottuja matalia säätösauvoja, niin että reaktori pysyy stabiilina.

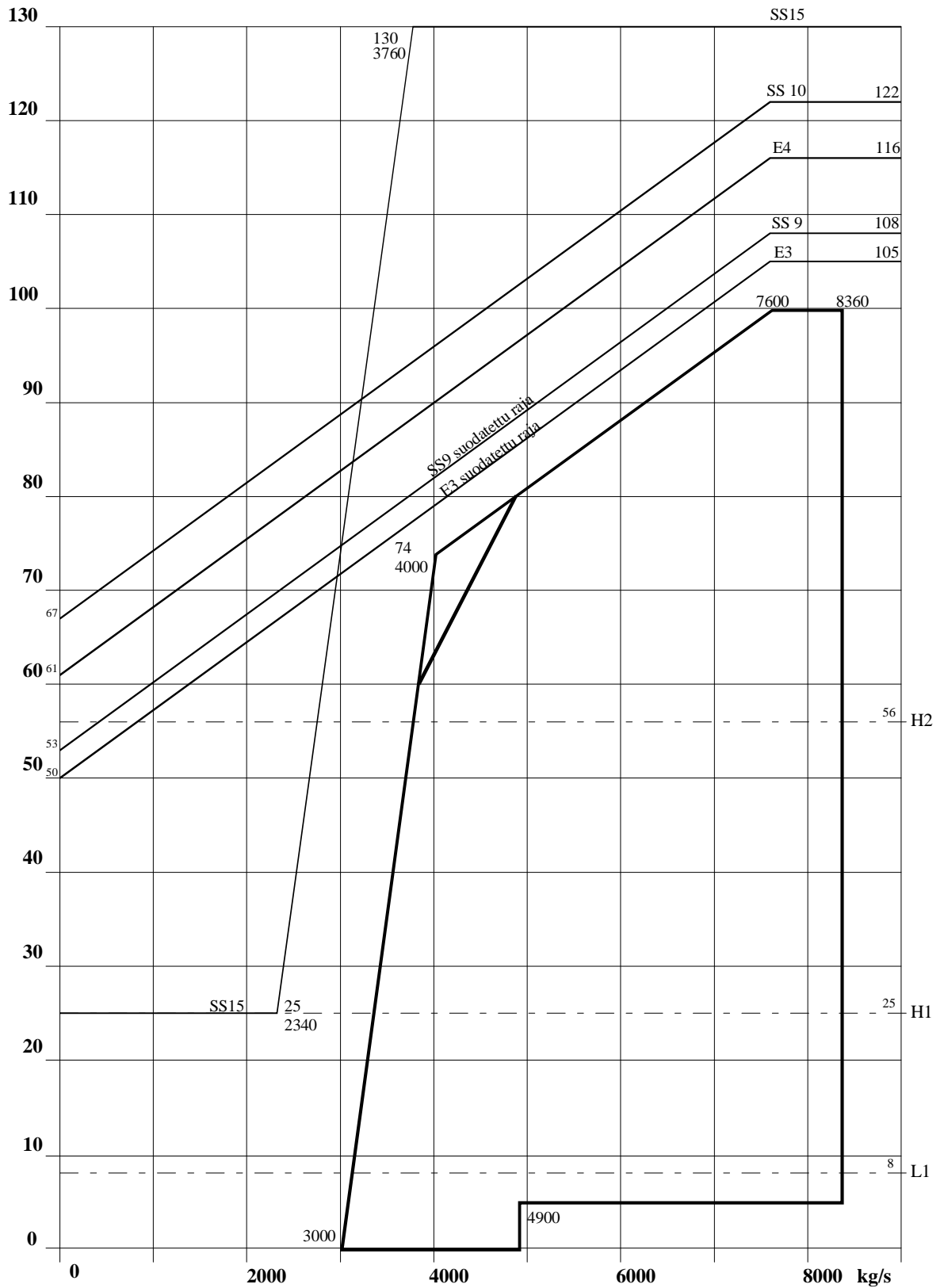
Stabiilisuuteen vaikuttavat reaktorin teho, pääkiertovirtaus sekä jäähdytevirtauksen lämpötila. Tavallisesti kiehumisvesireaktorin käyttöpiste kuvataan teho-virtaus – koordinaatistossa. Kuvassa 8 on esitetty Olkiluodon kiehumisvesireaktoreiden käyttöaluekuvio. Reaktoreiden normaali käyttöalue on kuvattu paksulla, mustalla viivalla. SS-ehdot toimivat pikasulkuehtoina, joiden ylittyessä reaktorissa tapahtuu reaktoripikasulku ja reaktorin teho saadaan nopeasti laskemaan. E-ehdot toimivat tehonrajoitusketjuina estämällä säätösauvojen ulosvedon.

Reaktorin stabiilisuus on huonoimmillaan, kun reaktorin tehon suhde pääkiertovirtaukseen on suuri. Stabiilisuus siis heikkenee, mikäli teho kasvaa tietyllä virtauksella tai vastaavasti, kun virtaus pienenee tehotason pysyessä vakiona. Käytännössä stabiilisuus on huonoimmillaan käyttöalueen vasemmassa yläkulmassa, jossa pääkiertovirtaus on 4000 kg/s ja teho 74 % täydestä tehosta. Tämä piste sijaitsee tehonsäädön kieltoalueella, joka on merkattu käyttöalueen kuvaan kolmiona. Lähelle tätä ajopistettä päädytään, kun pääkiertopumput ajetaan minimikiertoiksi.

Tehoa voidaan säätää kahdella tavalla, kierroslukusäädöllä (VR, Varvtal Reglering) tai tehosäädöllä (ER, Effekt Reglering). Kierroslukusäädössä pääkiertopumppujen kierrosnopeudelle annetaan asetusarvo, jolloin pääkiertovirtaus pysyy vakiona. Kierroslukusäädössä tehoa muutetaan säätösauvoja ajamalla. Tällöin liikutaan käyttöaluekuviossa (kuva 8) pystysuorassa suunnassa. Kierroslukusäätöä käytetään myös, kun ollaan tehonsäädön kieltoalueella eli alueella, jossa ei voida käyttää tehosäätöä vaan säätö täytyy toteuttaa kierroslukusäädöllä. Kierroslukusäädöllä stabiilisuus on parempi. Kierroslukusäätö on lisäksi käytössä coast down -ajon aikana eli käyttöjakson lopussa tehon hiipussa maksimi pääkiertovirtauksella. (Poso 2003, 3.)

Tehosäätöä käytettäessä teholle on asetettu asetusarvo, jolloin tehoa säädetään muuttamalla pääkiertovirtausta. Tällöin siis pääkiertovirtausta nostamalla tai laskemalla saadaan tehoa säädettyä haluttuun suuntaan ja käyttöaluekuviossa liikutaan vaakasuorassa suunnassa. (Poso 2003, 3.)

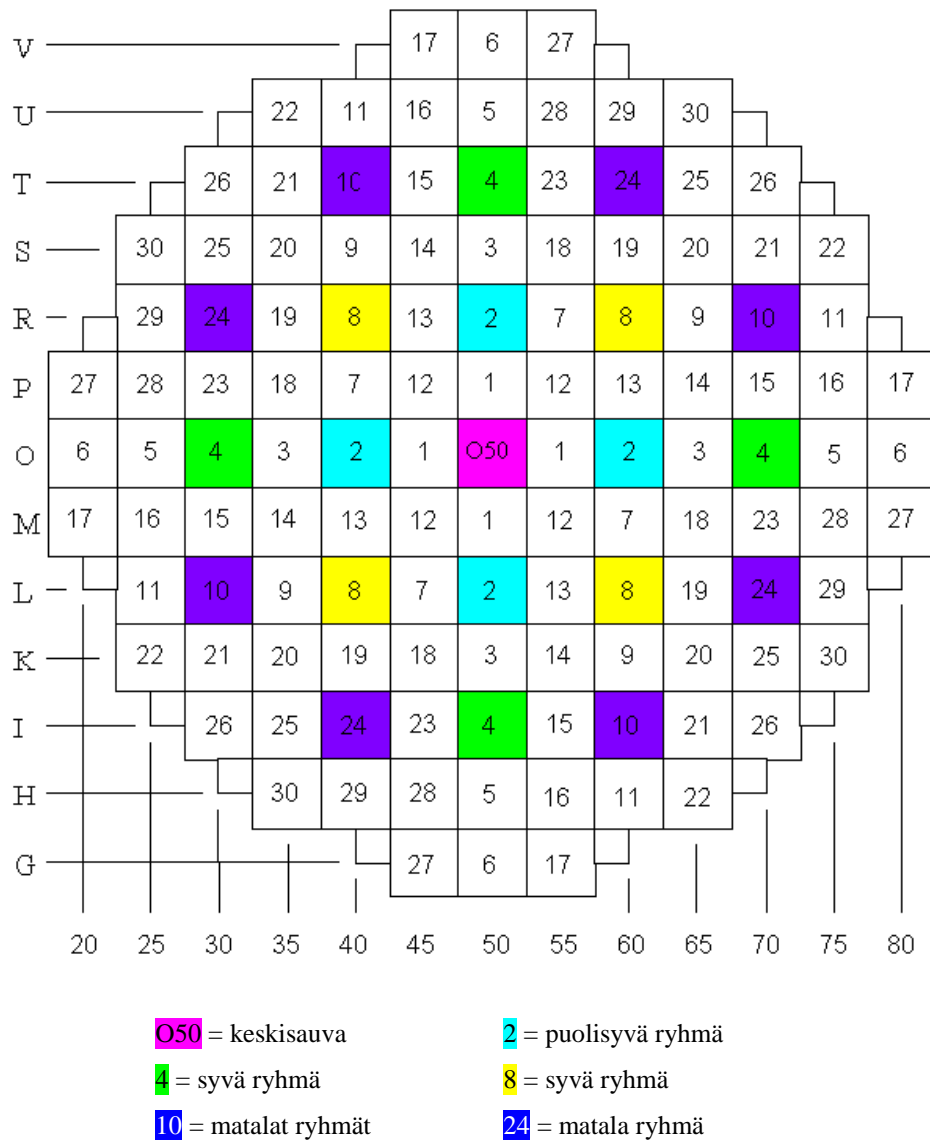
Teho %



Kuva 8. Olkiluodon kiehutusvesireaktoreiden käyttöalue (Poso 2004, 3).

Stabiilisuusominaisuudet heikkenevät mitä kauemmas normaalista käyttöalueesta joudutaan. Stabiilisuusominaisuudet paranevat, kun tehoa nostetaan virtauksen avulla. Stabiilisuus on tyypillisesti erittäin hyvä normaalin käytön aikana tehon ollessa 100 % ja virtauksen ollessa lähellä maksimiaan. (Hämäläinen 2005, 41, 66.)

Tulevan käyttöjakson suunnittelussa tulee ottaa huomioon säätösauvojen ajoa koskevat reunaehdot. Sydämen kasvutekijän säätöön käytön aikana käytetään säätöryhmiä, jotka muodostuvat keskisauvasta (O50), kahdesta syvästä ryhmästä (8, 4), puolisyvästä (2) sekä kahdesta matalasta ryhmästä (10 ja 24). Kuvassa 9 on esiteltynä eri väreillä Olkiluodon kiehutusvesireaktoreiden neljän säätösauvan ajoryhmät.



Kuva 9. Olkiluodon kiehutusvesireaktoreiden neljän säätösauvan ajoryhmät (Poso 2004, 32).

Matalia säätösauvoryhmiä käytetään pääasiallisesti aksiaalisen tehojakauman muokkaamiseen ja niiden vetotaso on tyypillisesti 70–100 prosenttia. Keskisauvalla sekä syvillä ryhmillä säädetään reaktiivisuutta ja näiden vetotaso vaihtelee välillä 4-100 %. Puolisivää ryhmää käytetään sekä reaktiivisuuden säätöön että tehojakauman muokkaamiseen ja sen vetotaso on tavallisesti 25–100 %. (Virlander 2001, 13, 17.)

Säätösauvojen liikuttelu vaikuttaa reaktiivisuuteen eniten, kun niiden ulosvetoprosentti on välillä 10–40 % (Virlander 2001, 17). Säätösauvoja ajettaessa tulee ottaa huomioon, että aina jonkun säätävän ryhmän vetoprosentin täytyy olla välillä 10–60 %. Myöskään säätäviä ryhmiä ei liikutella eri suuntiin eli toista ryhmää ei vedetä ulos sydäimestä kun toista samanaikaisesti työnnetään sydämeen. Ryhmillä on olemassa vakiintunut ajojärjestys, jota noudatetaan. Olkiluodon kiehutusvesireaktoreiden säätöryhmien ajojärjestys on 2, 4, O50 ja 8. Ensiksi ajetaan siis ryhmän 2 säätösauvoja, tämän jälkeen ryhmän 4 ja niin edelleen.

3.2 Tarkastellut tapaukset

Työhön valittiin tarkasteltavaksi viisi erilaista tapausta. Tavoitteena oli saada selville pysyykö reaktori stabiilina, vaikka sitä ajettaisiin ilman matalia säätösauvoja tai jos pääkiertovirtaus pysyisi koko käyttöjakson ajan vakiona. Työssä haluttiin myös tarkastella, kuinka stabiilisuudelle kävisi, jos reaktiivisuus olisi suunniteltua pienempi. On tärkeää, että reaktori pysyy koko ajan stabiilina ja ettei vaimenemistekijä ylitä arvoa 0,70. Lisäksi näiden reaktorisydämen eri ajotapojen vaikutus käyttöjakson pituuteen haluttiin selvittää.

Ensimmäisenä tarkastellussa tapauksessa reaktorisydäntä ajettiin ilman matalia säätösauvoja. Matalia säätösauvoja käytetään aksiaalisen tehojakauman muokkaamiseen. Reaktorisydämen tehojakauma on piikittynyt alhaalta, jolloin matalilla säätösauvoilla saadaan tarvittaessa tasattua tehojakaumaa. Matalien säätösauvojen käyttö kuitenkin huonontaa polttoainetaloutta ja lyhentää käyttöjakson pituutta, minkä takia niiden käyttö.

Toisessa tapauksessa jäähdytevirtaus on pidetty koko jakson ajan vakiona. Virtaukseksi valittiin 7650 kg/s. Tätä virtausta käytetään tavallisesti, kun reaktori toimii täydellä teholla. Käytettäessä suurempaa pääkiertovirtausta oltaessa täydellä teholla siirrytään ajokuviossa hieman oikealle, jolloin pumppujen alasajossa ei suoraan päädytä käyttöalueen epästabiileimmalle alueelle (teho noin 70 %, virtaus 4000 kg/s). Pääkiertovirtausta nostamalla pienenee aukko-osuus, jolloin moderointi paranee ja reaktiivisuus kasvaa.

Vastaavasti virtauksen pienentäminen laskee tehoa. Lataussuunnittelussa pyritään käyttämään vakiovirtausta. Saavutettaessa täyden tehon jaksonpituus ovat kaikki säätösauvat ulkona reaktorisydäimestä ja pääkiertovirtaus nostettu maksimiinsa, millä saadaan reaktiivisuutta ja tehoa pidettyä vielä ylhäällä. Teho alkaa kuitenkin pikku hiljaa laskea ja tätä vaihetta kutsutaan venytysajoksi.

Kolmannessa tapauksessa kaksi edellistä on yhdistetty eli reaktoria ajettiin ilman matalia säätösauvoja ja virtaus pidettiin vakiona. Lisäksi tarkasteltiin kahdesta eri näkökulmasta tilannetta, jossa reaktiivisuus oli arvioitua laskennallista tasoa 100 pcm alhaisempi. Toisessa tapauksessa reaktorisydäntä ajettiin ilman matalia säätösauvoja ja toisessa tapauksessa matalat säätösauvat olivat käytössä. Käyttöjaksoa suunnitellessa arvioidaan todennäköinen laskentaohjelmasta saatava reaktiivisuustaso, joka pohjautuu edellisten käyttöjaksojen toteutuneisiin reaktiivisuustasoihin. Kun jaksoa ajetaan, tämä toteutuva reaktiivisuustaso yleensä muuttuu hieman suunnittelutasosta. Käyttöjaksolla 30 alkujaksosta toteutuva taso on ollut hieman suunnittelutason alapuolella, mikä on voitu havaita muun muassa LPRM-kalibrointien perusteella. Sen takia tarkasteltavaksi valittiin myös tilanne, jossa laskennasta saatu reaktiivisuustaso onkin alkuperäistä arviota alhaisempi.

3.3 Vaimenemistekijän laskeminen

Kaikille tarkastelluille viidelle tapaukselle laskettiin vaimenemistekijä 33 käyttöpisteessä. Ensimmäinen käyttöpiste oli jakson alussa eli 314,757 täystehotuntia (EFPH) ja seuraava oli 500 EFPH. Tästä eteenpäin vaimenemistekijä laskettiin 500 EFPH:n välein 4000 EFPH:n asti. Tämän jälkeen vaimenemistekijä laskettiin 200 EFPH:n välein tarkempien tuloksien saamiseksi. Käyttöjakson kokonaispituus oli 8715 EFPH.

Laskenta suoritettiin kolmessa vaiheessa. Ensin jokaisella viidelle valitulle tapaukselle ajettiin jakso läpi SIMULATE-3:lla ja muodostettiin säätösauvojen ajokuviot. Jaksoa ajettaessa seurattiin, että kasvutekijä noudattaa haluttua tasoa ja termiset marginaalit ovat riittävät. Tämän vaiheen yhteydessä saatiin myös selville käyttöjakson täyden tehon jaksonpituus.

Seuraavaksi tarkasteltiin reaktorisydämen käyttäytymistä pääkiertopumppujen alasajon yhteydessä. Reaktori ajetaan tällöin sen hetkisestä käyttötilasta tilaan, jossa pumput ovat

minimikierröksillä. Pääkiertopumppujen alasajon yhteydessä teho asettuu noin 70 %:n tasolle ja pääkiertovirtaus on noin 4000 kg/s. Reaktori on siis tällöin käyttöalueensa epästabiileimmalla alueella. Laskuilla varmistettiin, että CPR (Critical Power Ratio) pysyy alasajon yhteydessä yli yhden. CPR kuvaa etäisyyttä lämmönsiirtokriisistä ja sillä tarkoitetaan kriittisen tehon eli tehon, jolla systeemi ajautuu lämmönsiirtokriisiin suhdetta vallitsevaan tehoon. Lämmönsiirtokriisin seurauksena lämmönsiirto polttoaineesta jäädytteeseen heikkenee ja polttoaineen suojakuori voi vaurioitua.

Lopuksi määritettiin vaimenemistekijä. Vaimenemistekijä laskettiin SIMULATE-3K:lla kaikille viidelle tapaukselle jokaisessa tarkastellussa käyttöpisteessä.

4 TULOSTEN TARKASTELU

OL2 reaktorille suoritetuissa stabiilisuustarkasteluissa saadut tulokset ovat esiteltyinä taulukoissa 1 ja 2. Taulukoihin on koottu jokaiselle tapaukselle kaikissa lasketuissa käyttöpisteissä saadut vaimenemistekijät ja taajuudet. Lisäksi kuvassa 10 on havainnollistettu kuvaajalla tarkastetuilla tapauksilla lasketut vaimenemistekijät. Liitteeseen 1 on koottu jokaisella tapauksella piirretyt omat vaimenemistekijän kuvaajat.

Tuloksista voidaan havaita, että kaikissa tarkastelluissa tapauksissa vaimenemistekijä ylittää 0,70 rajan. Suurimmallaan vaimenemistekijä käy, kun reaktoria ajetaan ilman matalia säätösauvoja ja virtaus pidetään vakiona. Maksimiarvon vaimenemistekijä saavuttaa tässä tapauksessa 5000 EFPH:n kohdalla, jolloin vaimenemistekijä on 0,79.

Vaimenemistekijä saa melkein kaikissa tarkastelluissa tapauksissa suurimman arvonsa 5000 EFPH:n tuntumassa. Tällöin polttoaineessa oleva niin sanottu palava absorbaattori eli gadolinium, jolla kompensoidaan jakson alussa ylijäämäreaktiivisuutta, alkaa olla palanut pois. Tämän jälkeen ylijäämäreaktiivisuuden kompensointiin käytetään säätösauvoja ja pääkiertovirtausta.

Kun reaktoria ajetaan ilman matalia säätösauvoja, saa vaimenemistekijä suuria arvoja. Ilman matalia säätösauvoja tehotaso kasvaa helposti liikaa reaktorisydämen alaosassa ja tehojakaumasta tulee hyvin epätasainen. Tällöin teho lähtee helpommin värähtelemään sydämessä ja siitä tulee epästabiili.

Reaktoria ajettaessa muuten samoin kuin alkuperin on suunniteltu, mutta muuttamalla reaktiivisuutta 100 pcm alhaisemmaksi, saadaan tarkastelluista tapauksista alhaisimmat vaimenemistekijät. Tässä tapauksessa vaimenemistekijä saa suurimman arvonsa 3500 EFPH kohdalla, jolloin arvoksi tulee 0,73.

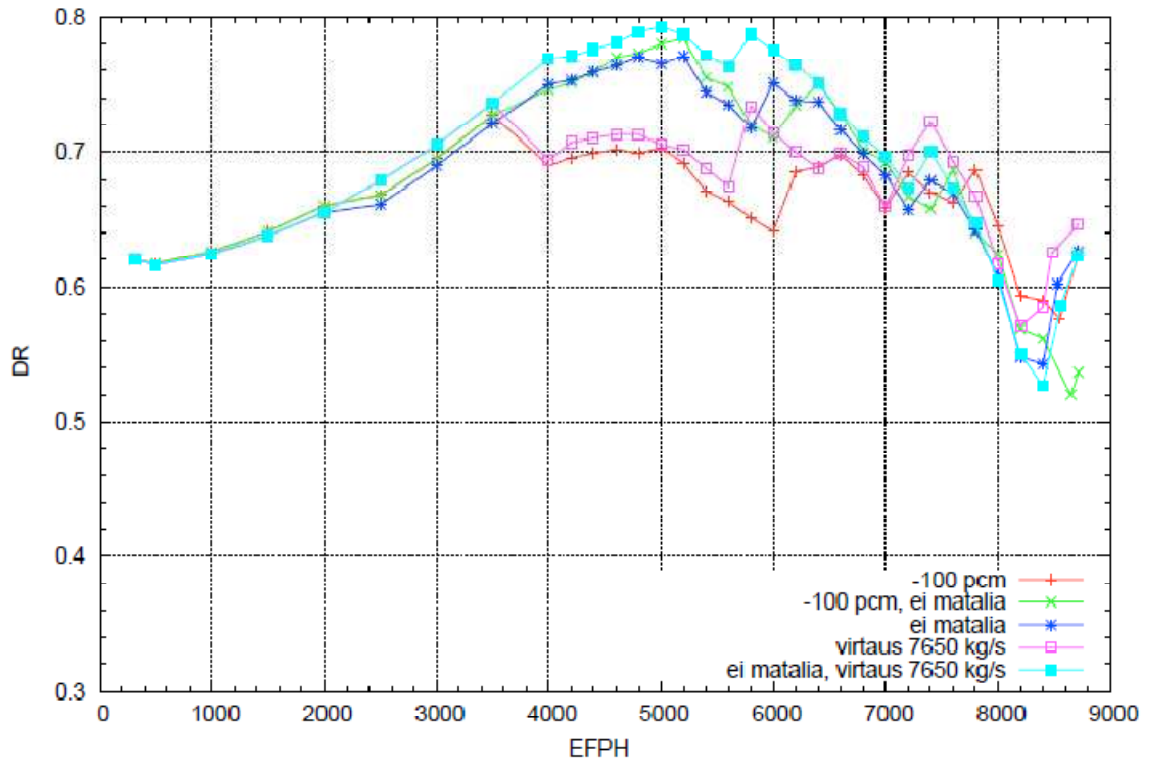
Saaduista tuloksista nähdään, että kaikissa tapauksissa vaimenemistekijä saa liian suuria arvoja eikä reaktoria ole turvallista ajaa ilman matalia säätösauvoja tai pitämällä pääkiertovirtausta vakiona. Reaktorisydäntä ajettaessa täytyy pääkiertovirtausta säätää ja käyttää matalia säätösauvoja, jotta vaimenemistekijä pysyy alle 0,70.

Kaikissa tarkastelluissa tapauksissa täydentehon jaksonpituus kasvoi. Alkuperäisessä suunnitelmassa täydentehon jaksonpituus on 8464 EFPH. Pisimmäksi jakso kasvoi, kun reaktiivisuus oli 100 pcm alhaisempi ja matalat säätösauvat eivät olleet käytössä. Täydentehon jaksonpituudeksi tuli tällöin 8650 EFPH. Toiseksi pisin täydentehon jaksonpituus 8560 EFPH oli, kun reaktoria ajettiin vakiovirtauksella ilman matalia säätösauvoja. Vähiten jakso piteni, kun reaktoria ajettiin vakiovirtauksella ja matalat säätösauvat olivat käytössä. Täydentehon jaksonpituus oli tässä tapauksessa 8480 EFPH.

Laskennallisen tapauksen, jossa reaktiivisuutta on pienennetty, voi ajatella vastaavan tapausta, jossa tehotasoa on alennettu. Mitä alhaisempi tehotaso on, sitä hitaammin polttoaineen mukana reaktoriin ladattua ylijäämäreaktiivisuutta vapautetaan ja kulutetaan. Kun reaktiivisuutta vapautetaan hitaammin, muun muassa säätösauvoja liikutellaan myöhemmin. Suurin vaikutus täydentehon jaksonpituuteen on siis matalilla säätösauvoilla. Matalien säätösauvojen käyttö huonontaa aina polttoainetaloutta ja vähentää jakson lopussa jäljellä olevaa reaktiivisuutta. Tämän takia tämä alhaisempi tehotaso ja reaktorin ajaminen ilman matalia säätösauvoja on reaktiivisuuden kannalta kaikkein edullisin.

Liitteeseen 2 on kahdelle tarkastellulle tapaukselle esitetty jakson yli aksiaaliset tehojakaumat sekä säätösauvakuviot. Säätösauvakuviossa näkyy säätösauvojen ulosvetoprosentti. Kuvista käy ilmi myös kasvutekijä, teho (%P) ja pääkiertovirtaus (%W). Liitteessä 2 on ensin esitelty tehojakaumat ja säätösauvakuviot tarkastelussa stabiileimmaksi osoittautuneelle tapaukselle eli tapaukselle, jossa reaktiivisuus oli 100 pcm alhaisempi kuin alun perin laskennallisesti suunniteltu. Toiseksi liitteessä on esitelty

tarkastelussa epästabiileimmaksi osoittautunut tapaus eli tapaus, jossa ei jakson aikana käytetty matalia säätösauvoja ja virtaus pidettiin vakiona.



Kuva 10. Vaimenemistekijä (DR) kuvattuna täyستهotuntien (EFPH) funktiona kaikille tarkastelluille tapauksille.

Taulukko 1. Vaimenemistekijä ja taajuus eri käyttöjaksos vaiheissa, kun reaktoria ajetaan ilman matalia säätösauvoja (vasen), kun virtaus on vakio 7650 kg/s (keskellä) ja kun reaktoria ajetaan ilman matalia säätösauvoja ja virtaus on vakio.

EFPH	DR	f [Hz]	EFPH	DR	f [Hz]	EFPH	DR	f [Hz]
314,757	0,62	0,66	314,757	0,62	0,66	314,757	0,62	0,66
500	0,62	0,66	500	0,62	0,66	500	0,62	0,66
1000	0,62	0,66	1000	0,62	0,66	1000	0,62	0,66
1500	0,64	0,66	1500	0,64	0,66	1500	0,64	0,66
2000	0,66	0,66	2000	0,66	0,66	2000	0,66	0,66
2500	0,66	0,67	2500	0,68	0,67	2500	0,68	0,67
3000	0,69	0,68	3000	0,71	0,68	3000	0,71	0,68
3500	0,72	0,69	3500	0,74	0,69	3500	0,74	0,69
4000	0,75	0,71	4000	0,69	0,70	4000	0,77	0,71
4200	0,75	0,71	4200	0,71	0,70	4200	0,77	0,71
4400	0,76	0,71	4400	0,71	0,70	4400	0,78	0,71
4600	0,76	0,71	4600	0,71	0,70	4600	0,78	0,71
4800	0,77	0,71	4800	0,71	0,70	4800	0,79	0,71
5000	0,77	0,71	5000	0,71	0,70	5000	0,79	0,71
5200	0,77	0,70	5200	0,70	0,70	5200	0,79	0,71
5400	0,74	0,70	5400	0,69	0,70	5400	0,77	0,70
5600	0,74	0,69	5600	0,68	0,70	5600	0,76	0,70
5800	0,72	0,70	5800	0,73	0,70	5800	0,79	0,71
6000	0,75	0,70	6000	0,71	0,69	6000	0,78	0,70
6200	0,74	0,68	6200	0,70	0,68	6200	0,76	0,68
6400	0,74	0,67	6400	0,69	0,67	6400	0,75	0,67
6600	0,72	0,66	6600	0,70	0,66	6600	0,73	0,66
6800	0,70	0,65	6800	0,69	0,65	6800	0,71	0,65
7000	0,68	0,64	7000	0,66	0,65	7000	0,70	0,65
7200	0,66	0,64	7200	0,70	0,66	7200	0,67	0,65
7400	0,68	0,66	7400	0,72	0,65	7400	0,70	0,65
7600	0,67	0,64	7600	0,69	0,64	7600	0,67	0,64
7800	0,64	0,63	7800	0,67	0,62	7800	0,65	0,63
8000	0,61	0,62	8000	0,62	0,61	8000	0,60	0,62
8200	0,55	0,61	8200	0,57	0,61	8200	0,55	0,61
8400	0,54	0,61	8400	0,59	0,62	8400	0,53	0,62
8530	0,60	0,62	8480	0,63	0,62	8560	0,59	0,62
8715	0,63	0,63	8715	0,65	0,62	8715	0,62	0,62

Taulukko 2. Vaimenemistekijä ja taajuus eri käyttöjakson vaiheissa, kun reaktiivisuus on 100 pcm keskimääräistä tasoa pienempi (vasen) ja kun reaktiivisuus on 100 pcm keskimääräistä tasoa pienempi ja matalia säätösauvoja ei ajeta.

EFPH	DR	<i>f</i> [Hz]	EFPH	DR	<i>f</i> [Hz]
314,757	0,62	0,66	314,757	0,62	0,66
500	0,62	0,66	500	0,62	0,66
1000	0,63	0,66	1000	0,63	0,66
1500	0,64	0,66	1500	0,64	0,66
2000	0,66	0,66	2000	0,66	0,66
2500	0,67	0,67	2500	0,67	0,67
3000	0,70	0,68	3000	0,70	0,68
3500	0,73	0,70	3500	0,73	0,70
4000	0,69	0,70	4000	0,75	0,71
4200	0,70	0,71	4200	0,75	0,72
4400	0,70	0,71	4400	0,76	0,72
4600	0,70	0,71	4600	0,77	0,72
4800	0,70	0,71	4800	0,77	0,72
5000	0,70	0,70	5000	0,78	0,71
5200	0,69	0,70	5200	0,78	0,71
5400	0,67	0,69	5400	0,76	0,70
5600	0,66	0,69	5600	0,75	0,70
5800	0,65	0,69	5800	0,72	0,69
6000	0,64	0,69	6000	0,71	0,69
6200	0,69	0,69	6200	0,73	0,69
6400	0,69	0,68	6400	0,75	0,68
6600	0,70	0,66	6600	0,73	0,66
6800	0,68	0,65	6800	0,70	0,65
7000	0,66	0,64	7000	0,69	0,64
7200	0,69	0,63	7200	0,67	0,64
7400	0,67	0,63	7400	0,66	0,66
7600	0,66	0,64	7600	0,69	0,64
7800	0,69	0,63	7800	0,64	0,63
8000	0,65	0,61	8000	0,62	0,62
8200	0,59	0,61	8200	0,57	0,61
8400	0,59	0,60	8400	0,56	0,61
8550	0,58	0,61	8650	0,52	0,62
8715	0,62	0,62	8715	0,54	0,62

5 YHTEENVETO

Epästabiilisuustapahtumia on ilmennyt kiehutusvesilaitoksilla 1980-luvulta saakka. Syynä epästabiilisuusiilmiöiden yleistymiseen ovat muun muassa kehittynyt polttoaine-elementin rakenne sekä reaktorin ajo suurilla tehotasoilla.

Reaktorisydämen joutuessa epästabiiliin tilaan alkaa teho värähdellä. Tehovärähtelyt voivat olla vaimenevia, voimistuvia tai värähtely voi esiintyä vakioamplitudilla. Epästabiilisuutta voidaan kuvata monella tavalla, mutta tavallisesti käytetään vaimenemistekijää, joka on peräkkäisten amplitudien suhde. Vaimenemistekijän ollessa alle yksi on värähtely vaimenevaa ja reaktori on stabiili. Pahimmillaan tehovärähtelyt voivat aiheuttaa polttoaineaurioita ja sen takia reaktorin stabiilille käytölle pyritään luomaan edellytykset jo suunnittelussa.

Epästabiilisuusiilmiöt voidaan jakaa kahteen luokkaan syntytapansa perusteella. Sekä termohydrauliikasta että neutroniikasta johtuvia epästabiilisuusiilmiöitä ovat globaali epästabiilisuus ja alueellinen epästabiilisuus. Sekä neutroniikasta että termohydrauliikasta tai pelkästä termohydrauliikasta aiheutuva epästabiilisuusiilmiö on lokaali epästabiilisuus.

Monet parametrit vaikuttavat reaktorisydämen stabiilisuuteen ja näitä muuttamalla voidaan parantaa tai heikentää stabiilisuutta. Osa parametreista vaikuttaa neutroniikkaan, osa termohydrauliikkaan ja osa molempiin. Muun muassa reaktorin teho, jäähdytevirtauksen lämpötila ja pääkiertovirtaus vaikuttavat stabiilisuuteen.

Työssä tarkasteltiin Olkiluoto 2 laitosesikön stabiilisuutta käyttöjaksolla 30 (2010–2011). Suoritettujen ennakkolaskujen perusteella reaktorisydämen stabiilisuus on käytön kannalta rajoittava suure käyttöjaksolla 30. Työhön valittiin viisi erilaista tapausta tarkasteltavaksi. Ensimmäisessä tapauksessa tutkittiin stabiilisuuden käyttäytymistä, kun reaktoria ajettiin ilman matalia säätösauvoja. Toisessa tapauksessa stabiilisuutta tutkittiin, kun virtaus pidettiin koko käyttöjakson ajan vakiona, 7650 kg/s. Kolmannessa tapauksessa yhdistettiin kaksi edellistä eli reaktoria ajettiin ilman matalia säätösauvoja ja virtaus pidettiin vakiona. Lopuksi tarkasteltiin vielä kahta tapausta, joissa reaktiivisuus oli 100 pcm alhaisempi kuin alun perin suunniteltu. Toisessa näistä tapauksista ei tehty muita muutoksia kuin laskettu reaktiivisuustasoa, mutta toisessa reaktoria ajettiin myös ilman matalia säätösauvoja.

Laskuissa käytettiin SIMULATE-3 ja SIMULATE-3K ohjelmistoja. SIMULATE-3:a käytetään sydämen tilan valvontaan ja sen avulla pystytään selvittämään muun muassa termiset marginaalit sekä sydämen tehojakauma. SIMULATE-3K:lla saadaan määritettyä vaimenemistekijä jokaisessa tarkastelussa käyttöpisteessä.

Työssä suoritettut laskut koostuivat kolmesta vaiheesta. Ensin SIMULATE-3:n avulla ajettiin jakso jokaiselle käsitellylle tapaukselle ja muodostettiin säätösauvojen ajokuviot. Tämän jälkeen suoritettiin pumppujen alasajo kaikille tarkastelluille käyttötiloille. Lopuksi SIMULATE-3K:n avulla laskettiin kaikille käyttöpisteille vaimenemistekijä. Vaimenemistekijä laskettiin jokaisessa viidessä tarkastellussa tapauksessa 33 käyttöpisteessä. Tiheimmillään laskut suoritettiin 200 EFPH:n askelin.

Jotta pystytään takaamaan reaktorisydämen stabiilisuus käytön aikana, tulee vaimenemistekijän olla alle 0,70. Laskuista saatujen tulosten perusteella huomattiin, että yhdessäkään tarkastellussa tapauksessa vaimenemistekijä ei pysynyt koko käyttöjakson ajan alle 0,70 rajan. Vaimenemistekijä sai suurimman arvonsa, kun reaktoria ajettiin ilman matalia säätösauvoja ja virtaus pidettiin koko käyttöjakson ajan vakiona. Tällöin vaimenemistekijä sai maksimiarvokseen 0,79. Vaimenemistekijä täytyy siis virtauksen ja säätösauvojen avulla pitää tarpeeksi alhaisena.

Tuloksista pystytään myös huomaamaan, että jokaisessa tarkastellussa tapauksessa täydentehon jaksonpituus kasvoi. Suurin vaikutus jakson pituuteen oli matalilla säätösauvoilla. Matalien säätösauvojen käyttö huonontaa polttoainetaloutta ja vähentää siten jakson lopussa jäljellä olevaa reaktiivisuutta, jolloin myös käyttöjakso lyhenee.

LÄHTEET

Bergdahl Bengt-Göran, Oguma Ritsuo, Karlsson Joakim K.-H. 2005. Textbook BWR-stability. Nyköping: GSE Power Systems AB. 230 s.

Borkowski Jeffrey A., Grandi Gerardo, Smith Kord S. 2007. SIMULATE-3K Models & Methodology. Studsvik Scandpower. 125 s.

Demazière Christophe, Pázt Imre. 2005. On the possibility of the space- dependence of the stability indicator (decay ratio) of a BWR. Annals of Nuclear Energy Vol. 32. Issue 12. s. 1305-1322 .

Ginestar D., Hennig D., Miró R., Verdú G. 2000. On the regional oscillation phenomenon in BWR's. Progress in Nuclear Energy. Vol. 36. Issue 2. s. 189–229.

Hämäläinen Tiina. 2005. SIMULATE-3K:n kelpoistaminen Olkiluodon kiehutusvesireaktoreille. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Teknisen luonnontieteellinen osasto. Olkiluoto. 79 s.

Kärkkäinen Heikki. 2008. Kiehutusvesireaktorin tehojakauman estimointi yhdistämällä mittauksia ja mallipohjaisia tuloksia. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Automaatiotekniikan koulutusohjelma. Olkiluoto. 58 s.

Laukkanen Jarkko, Nurminen Tomi H. 2009. OL1/OL2 - Stabiilisuus- ja kohinamittausten koeohjelma. Olkiluoto: Teollisuuden Voima Oyj. Julkaisematon materiaali. 102736. 9 s.

Niemi Jari. 2005. Neutronivuon mittausjärjestelmän 531 koulutusaineisto. Olkiluoto: Teollisuuden Voima Oyj. Julkaisematon koulutusmateriaali. 102510. 47 s.

Nurminen Tomi H. 2007. SIMULATE - Tulosten lukuohje. Olkiluoto: Teollisuuden Voima Oyj. Julkaisematon materiaali. 112113. 14 s.

Poso Jarmo. 2003. OL1/OL2 - Käyttökäsikirja: Reaktorisydämen käyttöohje: Osa 1 - Normaali ajo. Olkiluoto: Teollisuuden Voima Oyj. Julkaisematon materiaali. 101327. 26 s.

Poso Jarmo. 2004. OL1/OL2 - Käyttökäsikirja: Reaktorisydämen käyttöohje: Osa 7 - Kuvat ja taulukot. Olkiluoto: Teollisuuden Voima Oyj. Julkaisematon materiaali. 108284. 34 s.

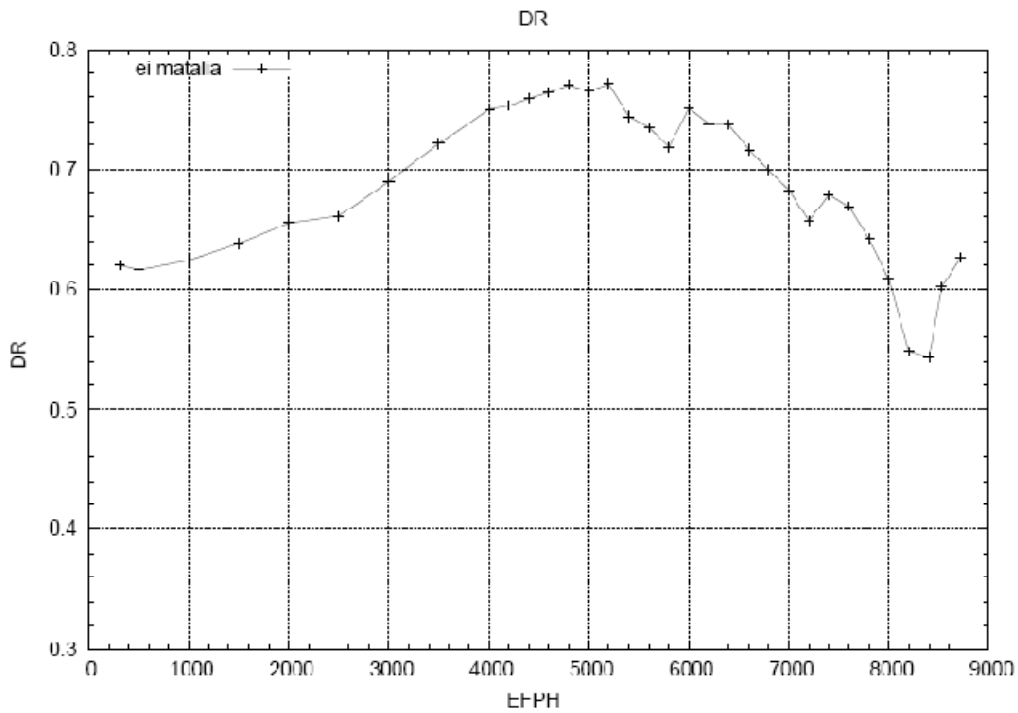
Stacey Weston M. 2007. Nuclear Reactor Physics. 2. painos. Atlanta, USA. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA 706 s. ISBN: 978-3-527-40679-1.

State of the Art Report on Boiling Water Reactor Stability (SOAR on BWRs). 1997. [verkkodokumentti] OECD-NEA. NEA/CSNI/R(96)21. [viitattu 9.9.2010] Saatavissa: <http://www.nea.fr/nsd/docs/1996/csni-r1996-21.pdf>

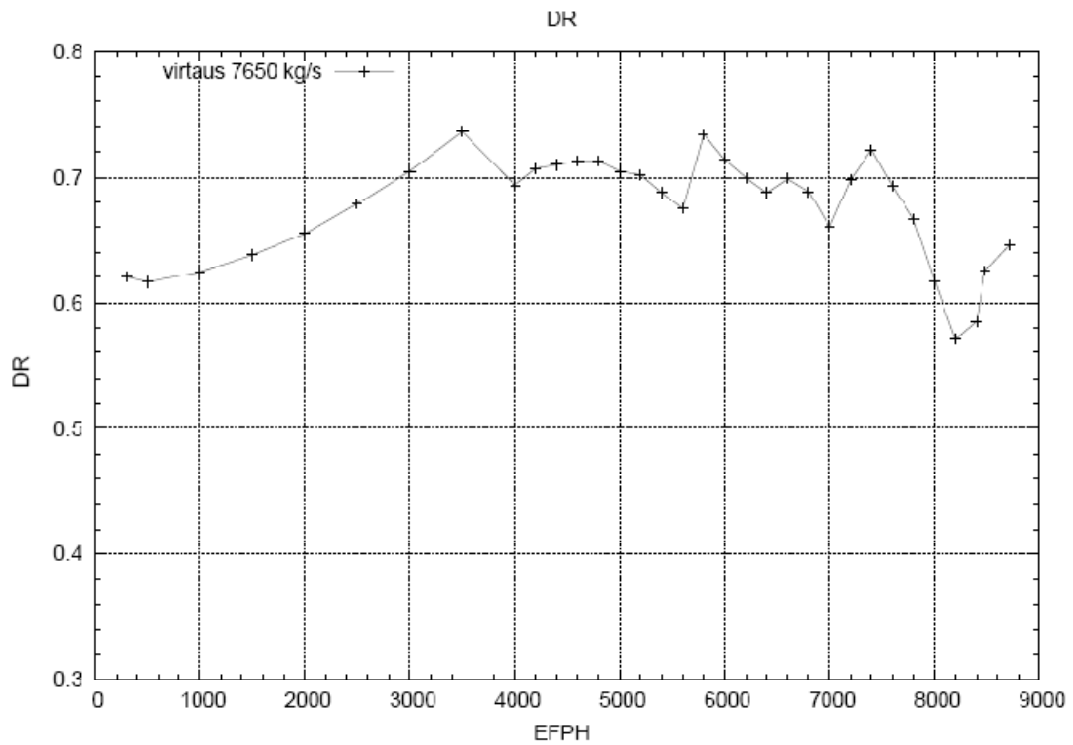
Teollisuuden Voima Oyj. 2007. Ydinvoimalaitosyksiköt Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2. 48 s. [verkkodokumentti] [viitattu 9.9.2010] Saatavissa: <http://www.tvo.fi/uploads/File/yksikot-OL1-OL2%281%29.pdf>

Virlander Hanna. 2001. Kiehumisvesireaktorin polttoaineen käytönsuunnittelumenetelmien kehittäminen. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Energiatekniikan osasto. Espoo. 97 s.

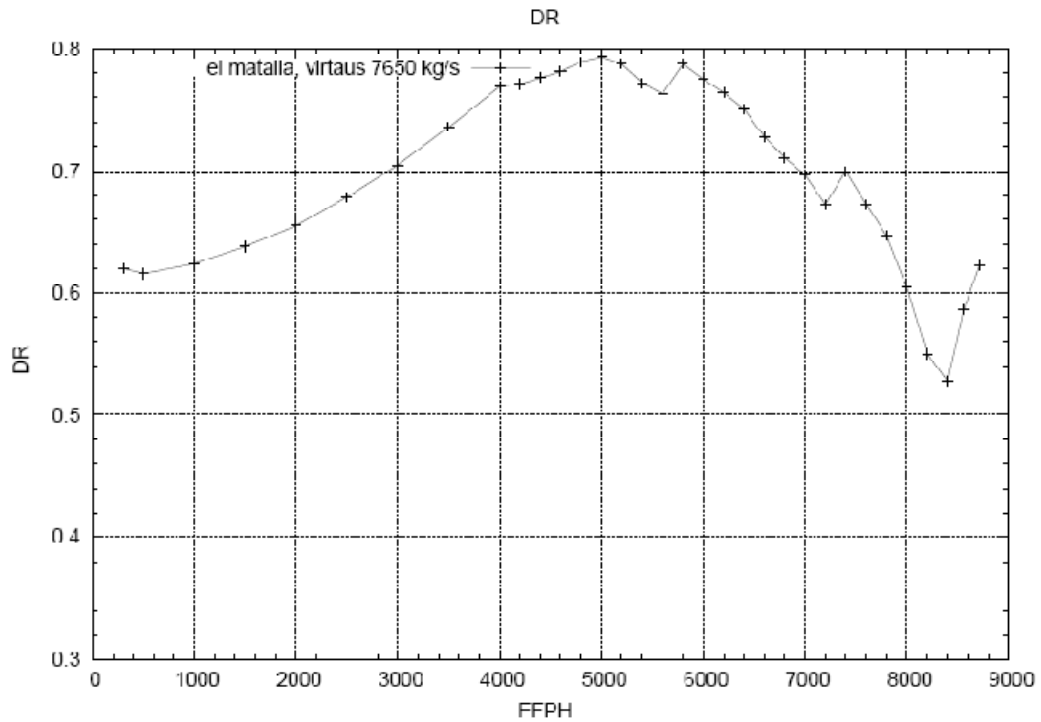
Liite 1. OL2 vaimenemistekijät



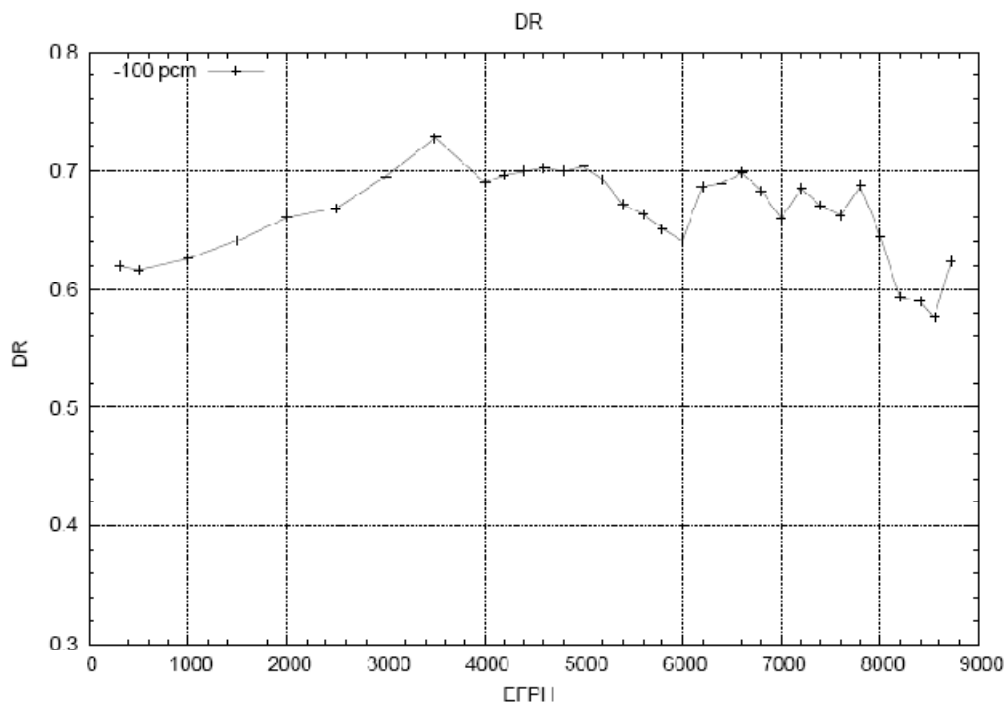
Kuva 11. OL2 vaimenemistekijä käyttöjaksolla 30, kun reaktoria ajetaan ilman matalia säätösauvoja.



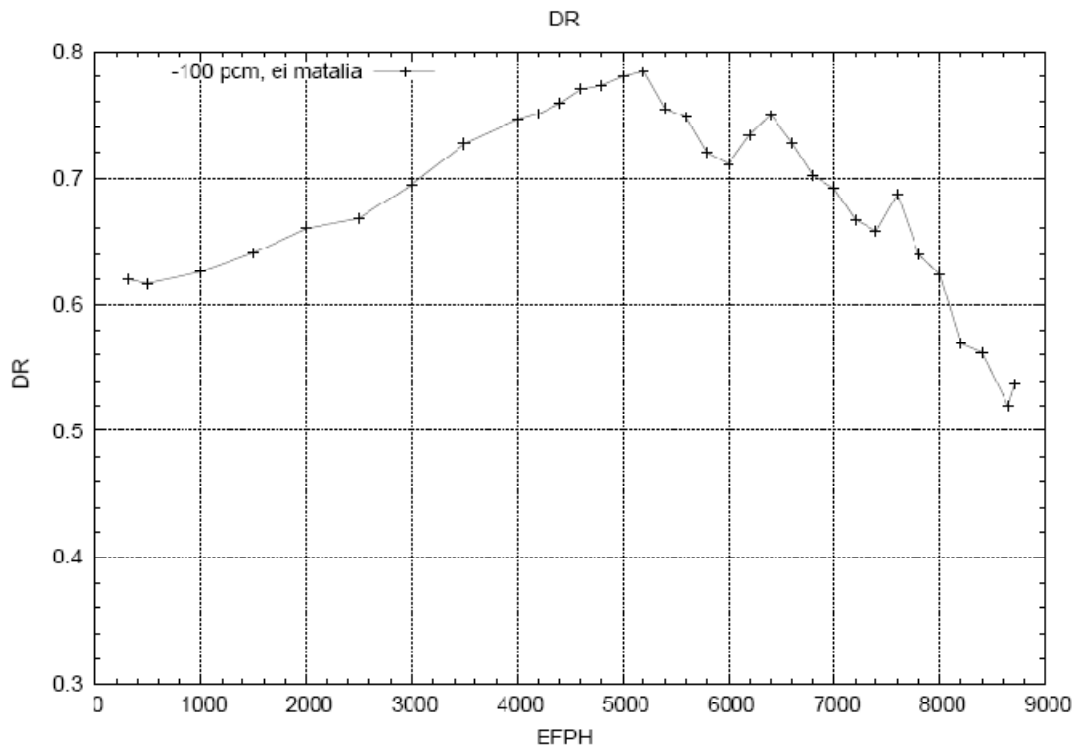
Kuva 12. OL2 vaimenemistekijä käyttöjaksolla 30, kun reaktoria ajetaan vakiovirtauksella, 7650 kg/s.



Kuva 13. OL2 vaimenemistekijä käyttöjaksolla 30, kun reaktoria ajetaan ilman matalia säätösauvoja ja vakiovirtauksella 7650 kg/s.

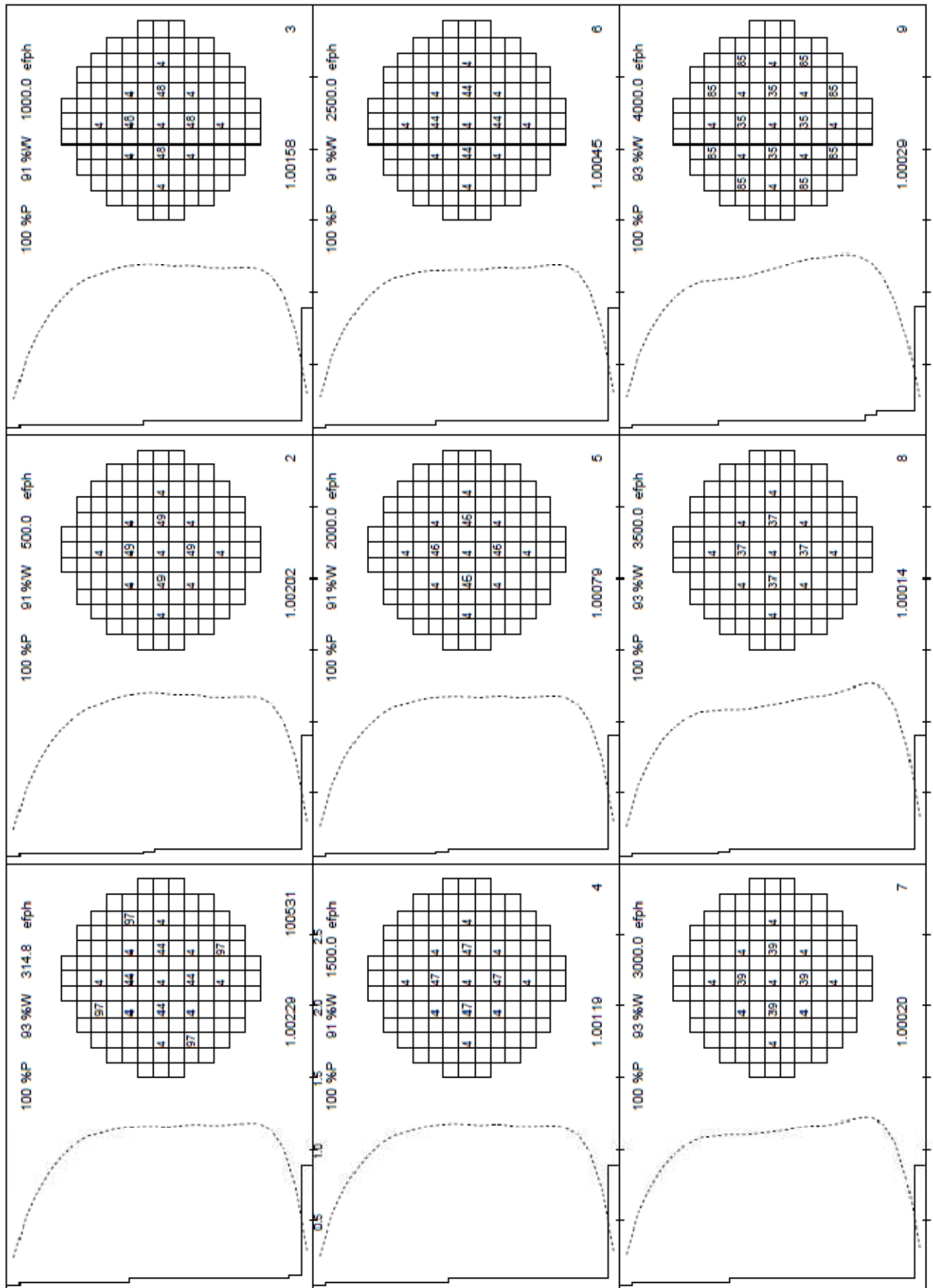


Kuva 14. OL2 vaimenemistekijä käyttöjaksolla 30, kun reaktiivisuus on 100 pcm alaisempi kuin alun perin suunniteltu.

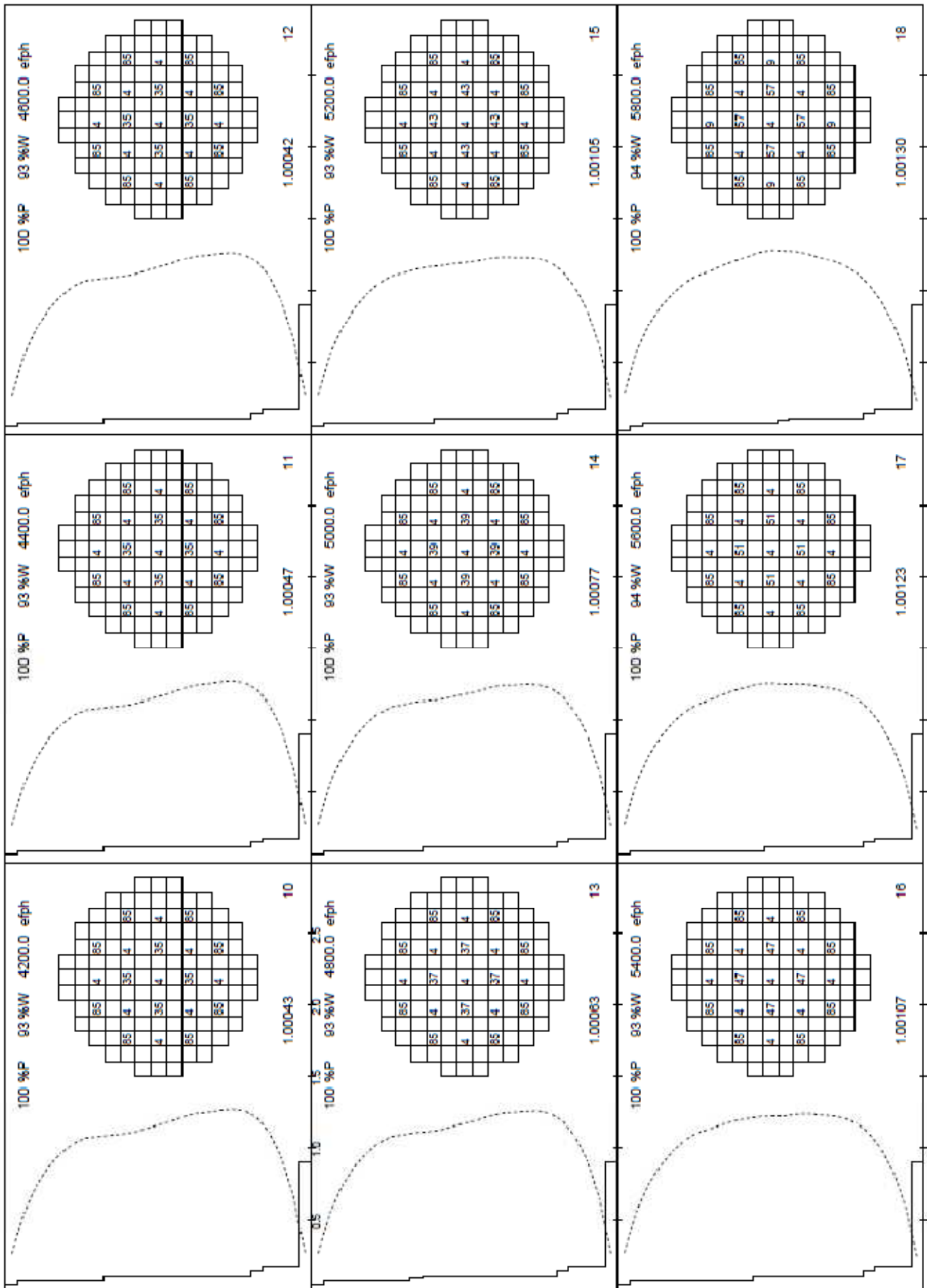


Kuva 15. OL2 vaimenemistekijä käyttöjaksolla 30, kun reaktiivisuus on 100 pcm alhaisempi kuin alun perin suunniteltu ja matalat säätösauvat eivät ole käytössä.

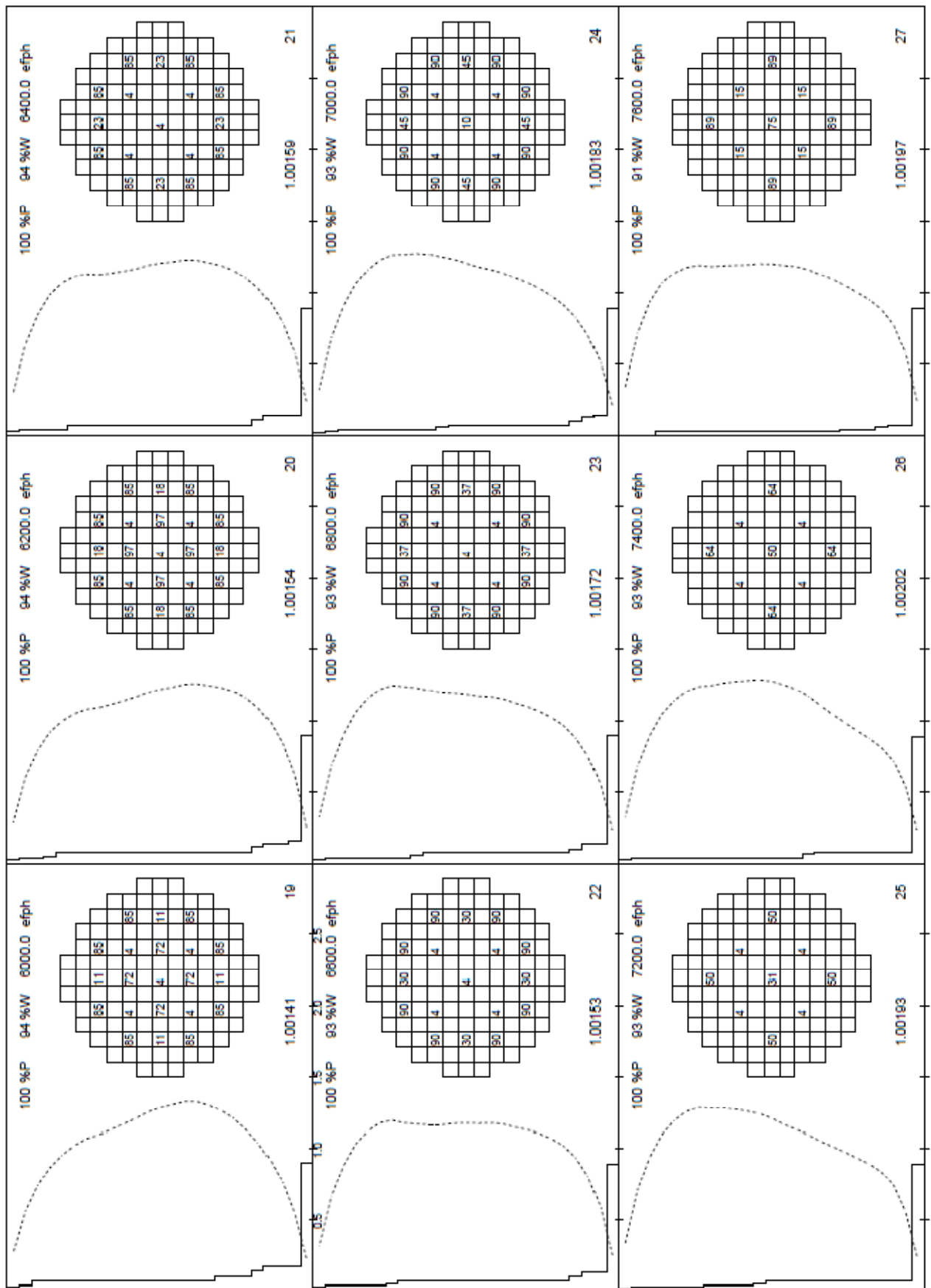
Liite 2. Aksiaaliset tehojakaumat ja säätösauvakuviot



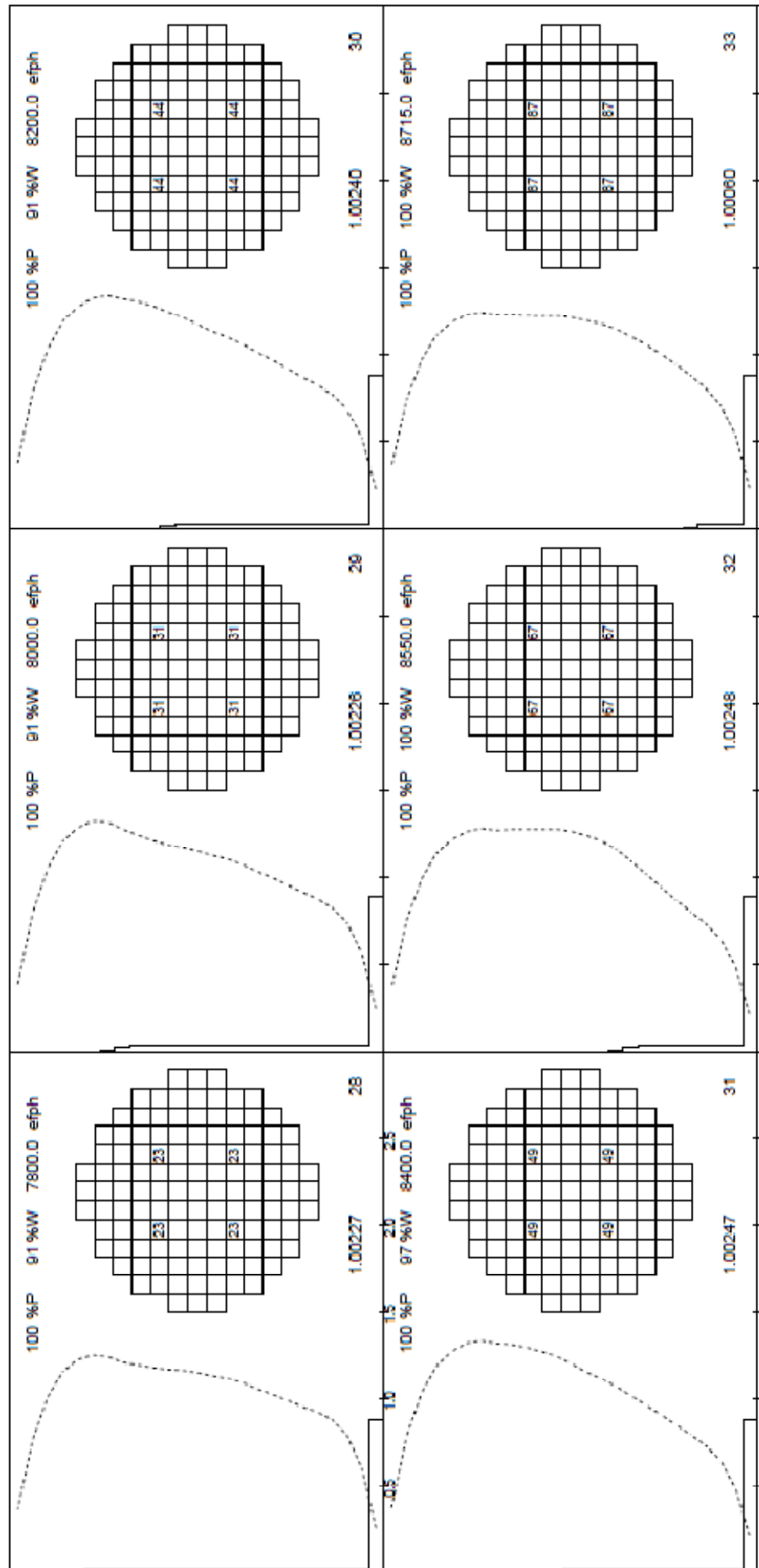
Kuva 16. Aksiaaliset tehojakaumat ja säätösauvakuviot tarkastellulle tapaukselle, jossa reaktiivisuus oli 100 pcm alaisempi kuin alun perin suunniteltu käyttöjakson ajalle 314,8 - 4000 EFPH.



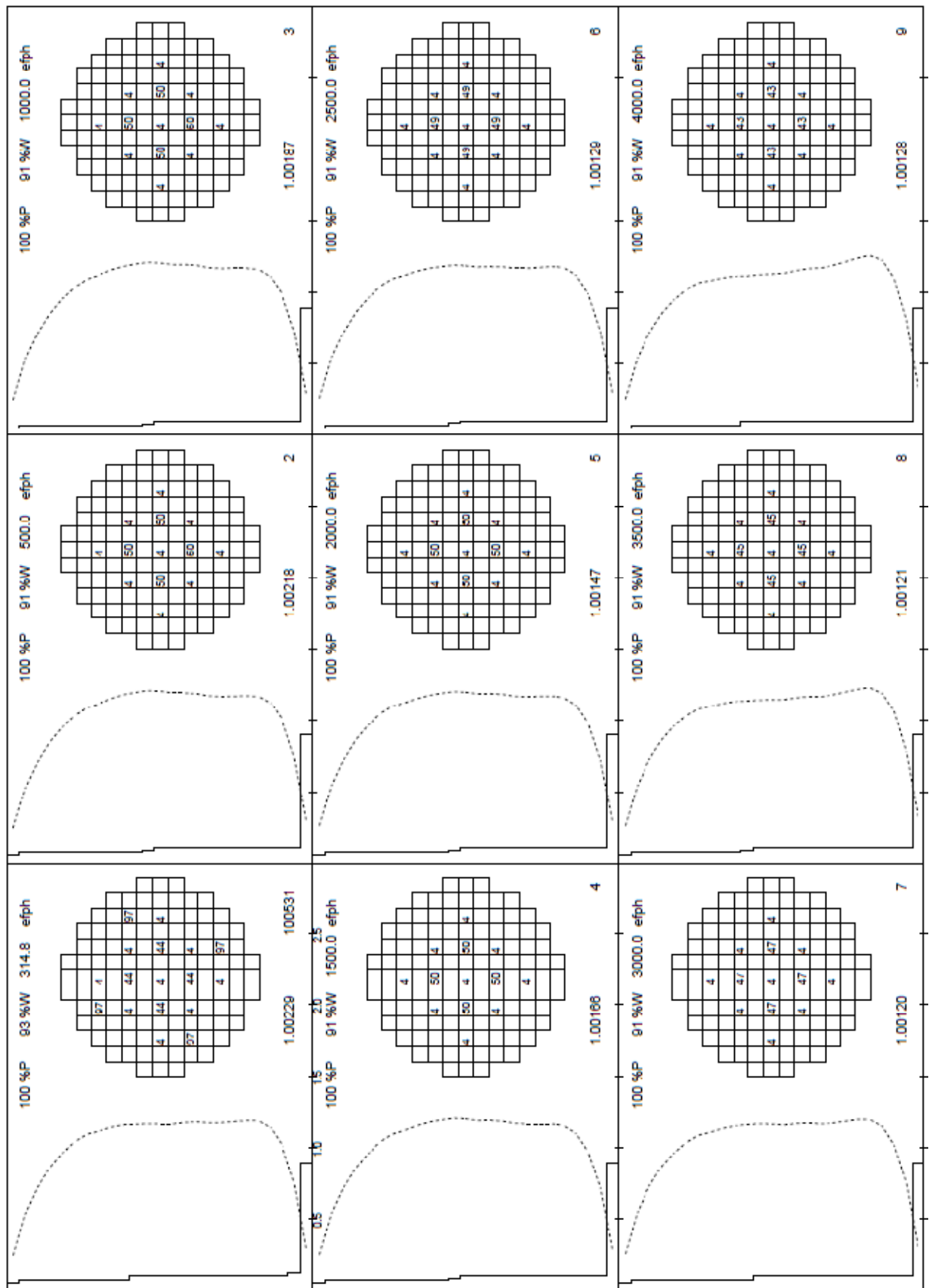
Kuva 17. Aksiaaliset tehojakaumat ja säätösauvakuviot tarkastellulle tapaukselle, jossa reaktiivisuus oli 100 pcm alhaisempi kuin alun perin suunniteltu käyttöjakson ajalle 4200 - 5800 EFPH.



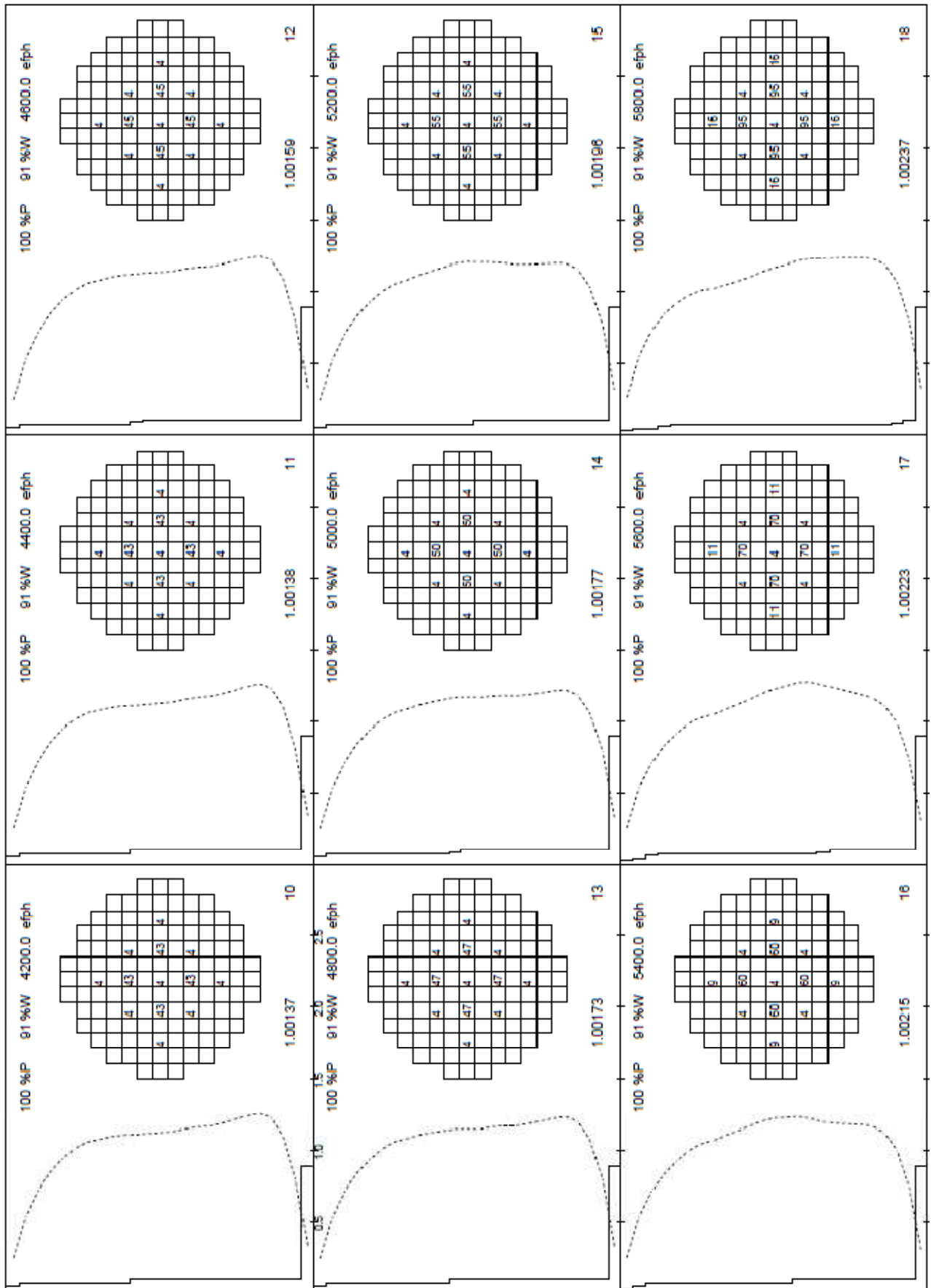
Kuva 18. Kuva 17. Aksiaaliset tehojakaumat ja säätösauvakuviot tarkastellulle tapaukselle, jossa reaktiivisuus oli 100 pcm alaisempi kuin alun perin suunniteltu käyttöjaksen ajalle 6000 - 7600 EFPH.



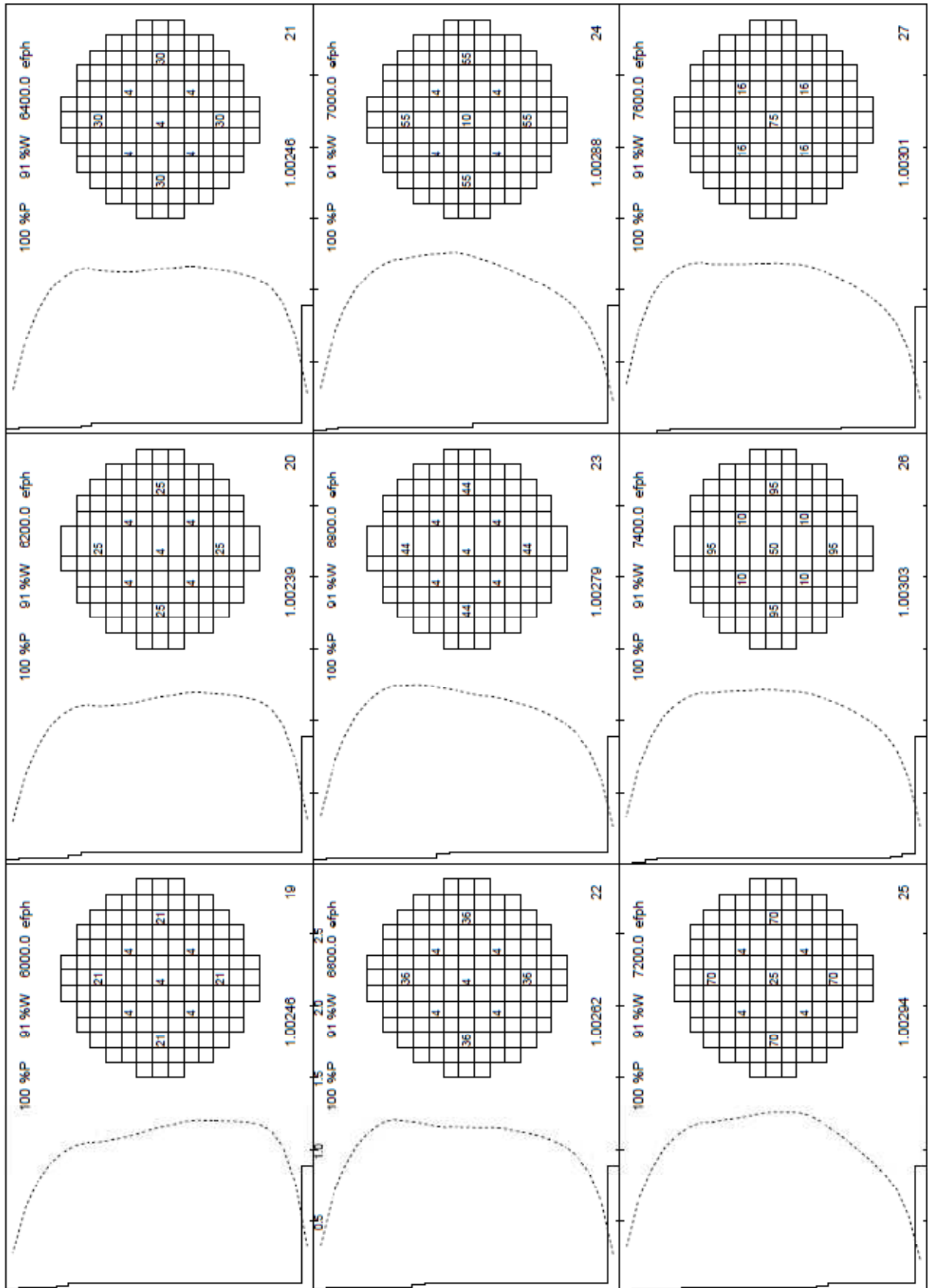
Kuva 19. Aksiaaliset tehojakaumat ja säätösauvakuviot tarkastellulle tapaukselle, jossa reaktiivisuus oli 100 pcm alhaisempi kuin alun perin suunniteltu käyttöjaksos ajalle 7800 - 8715 EFPH.



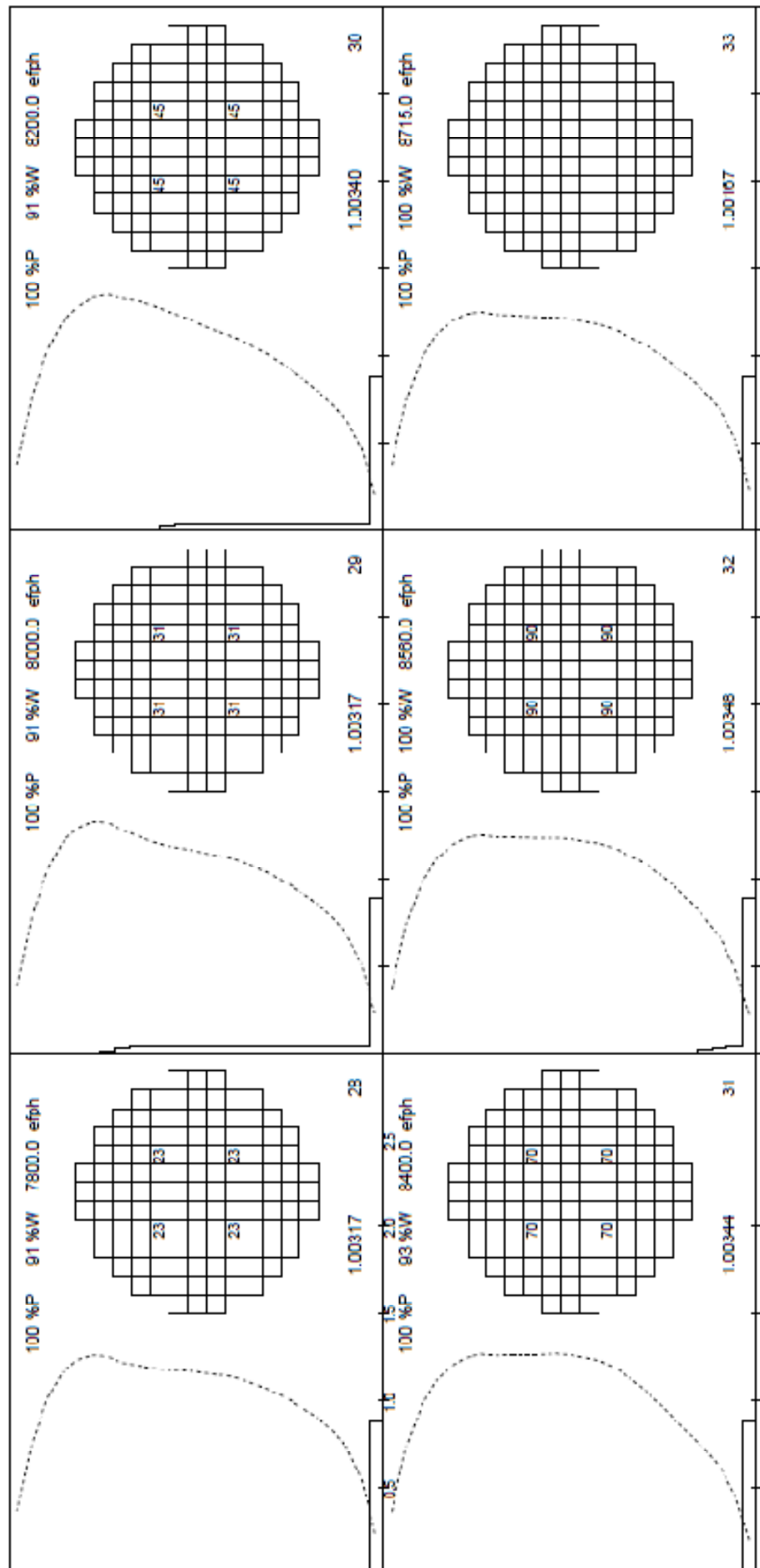
Kuva 20. Aksiaaliset tehojakaumat ja säätösauvakuviot tarkastellulle tapaukselle, jossa ei jakson aikana käytetty matalia säätösauvoja ja virtaus pidettiin vakiona jakson ajalle 314,8 - 4000 EFPH.



Kuva 21. Aksiaaliset tehojakaumat ja säätösauvakuviot tarkastellulle tapaukselle, jossa ei jakson aikana käytetty matalia säätösauvoja ja virtaus pidettiin vakiona jakson ajalle 4200 - 5800 EFPH.



Kuva 22. Aksiaaliset tehojakaumat ja säätösauvakuviot tarkastellulle tapaukselle, jossa ei jakson aikana käytetty matalia säätösauvoja ja virtaus pidettiin vakiona jakson ajalle 6000 - 7600 EFPH.



Kuva 23. Aksiaaliset tehojakaumat ja säätösauvakuviot tarkastellulle tapaukselle, jossa ei jakson aikana käytetty matalia säätösauvoja ja virtaus pidettiin vakiona jakson ajalle 7800 - 8715 EFPH.