

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

**SULKUMARGINAALIEN MALLINNUKSEN  
KEHITTÄMINEN  
DEVELOPMENT OF THE MODELING OF  
SHUTDOWN MARGINS**

Työn tarkastaja: Heikki Suikkanen

Työn ohjaaja: Heikki Suikkanen ja Matti Paajanen

Lappeenranta 17. joulukuuta 2016

Teemu Sikanen

# TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Teemu Sikanen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Heikki Suikkanen ja Matti Paajanen

Kandidaatintyö 2016

Sivuja 32, kuvia 10, liitteitä 1

Hakusanat: Kiehumisvesireaktori, reaktorifysiikka, sulkumarginaali, sammutusmarginaali, ydinturvallisuus, SIMULATE, Olkiluoto

Sulkumarginaaleilla varmistetaan, että reaktorisydän on reaktiivisuusominaisuuksiltaan tarkoitettussa tilassa ja saadaan alikriittiseksi sekä sammumaan missä tahansa tilassa. Sulkumarginaali rajat on määritelty viranomaisen määrittelemissä Ydinvoimalaitosohjeissa (YVL) sekä Turvallisuusteknisissä käyttöohjeissa (TTKE).

Teollisuuden Voima Oy:n (TVO) ydinvoimalaitosyksiköiden Olkiluoto 1 (OL1) ja Olkiluoto 2 (OL2) sulkumarginaalien mallintamiseen käytetään reaktorin valvonta- ja simulointiohjelmistoa SIMULATE-3 sekä siihen kuuluvia QPANDA- ja RFSDM-ohjelmistojä. Sulkumarginaalien mallintamisen lähtöarvoina käytetään SIMULATE online-järjestelmästä saatavia prosessin mittaustuloksia.

Sulkumarginaalien mallintamisessa käytössä olevassa ohjelmistossa esiintyy ongelmia erityisesti vaihtolatauksen aikaisten sulkumarginaalien mallintamisessa. Ongelman korjaamiseksi TVO on kehittänyt oman sulkumarginaalien mallintamisohjelmiston MKOALAn. Myös MKOALA käyttää laskennan lähtöarvoina SIMULATE ohjelmiston mittaustuloksia.

Tässä työssä selvitetään uuden sulkumarginaalien mallinnusohjelmiston, MKOALAn, eroja käytössä oleviin ohjelmiin sekä vertaillaan ohjelmia laskemalla molempien laitosten käyttöhistorian kylmäkriittisyydet sekä vuoden 2016 vuosihuoltojen vaihtolatauksien aikaiset sulkumarginaalit. Käytössä olevat QPANDA ja RFSDM vastasivat paremmin toisiinsa kuin kehitteillä oleva MKOALA vaihtolatauksien aikaisia sulkumarginaaleja mallinnettaessa. Tulosten perusteella ei voida kuitenkaan varmuudella päätellä ohjelmien tarkkuutta.

# SISÄLLYS

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1   | Johdanto . . . . .   | 6  |
| 1.1 | Olkiluodon kiehutusvesireaktoreiden kuvaus . . . . .                 | 6  |
| 1.2 | Reaktorin valvonta- ja simulointiympäristö . . . . .                 | 8  |
| 1.3 | Työn tavoitteet . . . . .  | 9  |
| 2   | Teoria . . . . .   | 10 |
| 2.1 | Ketjureaktio . . . . .   | 10 |
| 2.2 | Diffuusioteoria . . . . .  | 11 |
| 2.3 | Kaksiryhmäteoria . . . . .   | 12 |
| 2.4 | Puolitoistaryhmäteoria . . . . .                                     | 13 |
| 3   | Sulkumarginaali . . . . .  | 15 |
| 3.1 | Sulkumarginaalivaatimukset . . . . .                                 | 15 |
| 3.2 | Sulkumarginaalin määrittäminen . . . . .                             | 16 |
| 3.3 | Reaktiivisuuteen vaikuttavat tekijät . . . . .                       | 16 |
| 4   | Sulkumarginaalin mallintamisohjelmien ominaisuuksia . . . . .        | 19 |
| 4.1 | SIMULATE-3n QPANDA- ja RFSDM-mallit . . . . .                        | 19 |
| 4.2 | MKOALA . . . . .   | 20 |
| 5   | Sulkumarginaalien laskenta sydämensimulointiohjelmilla . . . . .     | 22 |
| 5.1 | Menneiden jaksojen sulkumarginaalien laskenta . . . . .              | 22 |
| 5.2 | R116:n ja R216:n vaihtolatauksen aikaiset sulkumarginaalit . . . . . | 23 |
| 6   | Johtopäätökset . . . . .   | 28 |
| 7   | Yhteenveto . . . . .   | 30 |

## SYMBOLILUETTELO

### Roomalaiset

|     |  |                   |
|-----|--|-------------------|
| $a$ | heijastuva osuus   | m                 |
| $D$ | diffuusiokerroin   | m                 |
| $f$ | vakiokerroin   | -                 |
| $f$ | epäjatkuvuustekijä                                       | -                 |
| $h$ | noodin pituus  | m                 |
| $J$ | neutronivirta  | 1/cm <sup>2</sup> |
| $k$ | kasvutekijä  | -                 |
| $L$ | diffuusiopituus  | cm                |
| $L$ | nettoneutronivirta noodin<br>seinien yli                 | 1/cm <sup>2</sup> |
| $M$ | migraatiopituus  | cm                |
| $n$ | neutronien lukumäärä                                     | -                 |
| $s$ | syntyvien neutronien määrä<br>aika- ja tilavuusyksikössä | 1/s               |
| $t$ | vakiokerroin   | -                 |

### Kreikkalaiset

|           |   |                     |
|-----------|---|---------------------|
| $\lambda$ | kriittinen ominaisarvo  | cm                  |
| $\nu$     | syntyvien epitermisten<br>fissionen neutronien luku<br>keskimäärin fissiota kohti | -                   |
| $\rho$    | reaktiivisuus   | -                   |
| $\Sigma$  | makroskooppinen vaikutusala   | cm <sup>-1</sup>    |
| $\phi$    | neutronivuo   | 1/cm <sup>2</sup> s |
| $\chi$    | neutronin todennäköisyys<br>syntyä ryhmään  | -                   |
| $\psi$    | alkeisfunktio   | -                   |

### Yläindeksit

|   |           |
|---|-----------|
| B | pohja     |
| E | itä       |
| N | pohjoinen |
| T | päällä    |
| S | etelä     |
| W | länsi     |

**Alaindeksit**

|            |                          |
|------------|--------------------------|
| <i>a</i>   | absorptio                |
| <i>f</i>   | fissio                   |
| <i>g</i>   | ryhmä                    |
| <i>eff</i> | efektiivinen             |
| <i>ref</i> | referenssi               |
| <i>r</i>   | efektiivinen alassironta |
| <i>s</i>   | sironta                  |
| <i>t</i>   | kokonais                 |
| <i>1</i>   | nopea ryhmä              |
| <i>2</i>   | hidas ryhmä              |

**Lyhenteet**

|       |   |
|-------|---|
| BWR   | Kiehutusvesireaktori  |
| CMS   | Core Management System  |
| PCI   | Pellet Cladding Interaction                                     |
| OL1   | Olkiluoto 1 -laitos   |
| OL2   | Olkiluoto 2 -laitos   |
| OL3   | Olkiluoto 3 -laitos   |
| PWR   | Painevesireaktori   |
| RFSDM | Polttoaineenvaihdon sulkumarginaali, Refuelling Shutdown margin |
| SDM   | Sulkumarginaali, Shutdown margin                                |
| TTKE  | Turvallisuustekniset käyttöehdot                                |
| TVO   | Teollisuudenvoima Oyj   |
| YVL   | Ydinvoimalaitosohje   |

# 1 JOHDANTO

Sulkumarginaalilla (SDM, Shutdown Margin), josta käytetään myös sammutusmarginaali ja sammutusvara nimityksiä, on tarkoitus varmistaa, että reaktori saadaan varmasti alkukriittiseksi ja sammumaan missä tahansa tilassa. Reaktorisydämen tulee olla myös reaktiivisuusominaisuuksien suhteen tarkoitettussa tilassa. Sulkumarginaalitarkastelut tulee tehdä kaikille käyttö- ja vaihtolataustilanteille. Vaatimukset sulkumarginaaleille eri tilanteissa määritellään Turvallisuusteknisissä käyttöehdoissa (TTKE) sekä viranomaisen määrittelemissä Ydinvoimalaitosohjeissa (YVL). (Laaksonen 2016b. 8, 41) Sulkumarginaalien mallintamiseen on käytössä useita eri ohjelmistoja kuten POLCA ja PANACEA (Paajanen 2016). TVO:lla (Teollisuuden Voima Oyj) sulkumarginaaleja mallinetaan Core Management System (CMS) reaktorinvalvontaohjelmistoon kuuluvalla SIMULATE-3 -sydänsimulaatio-ohjelmiston RFSDM- (Refueling Shutdown Margin) ja QPANDA-malleilla.

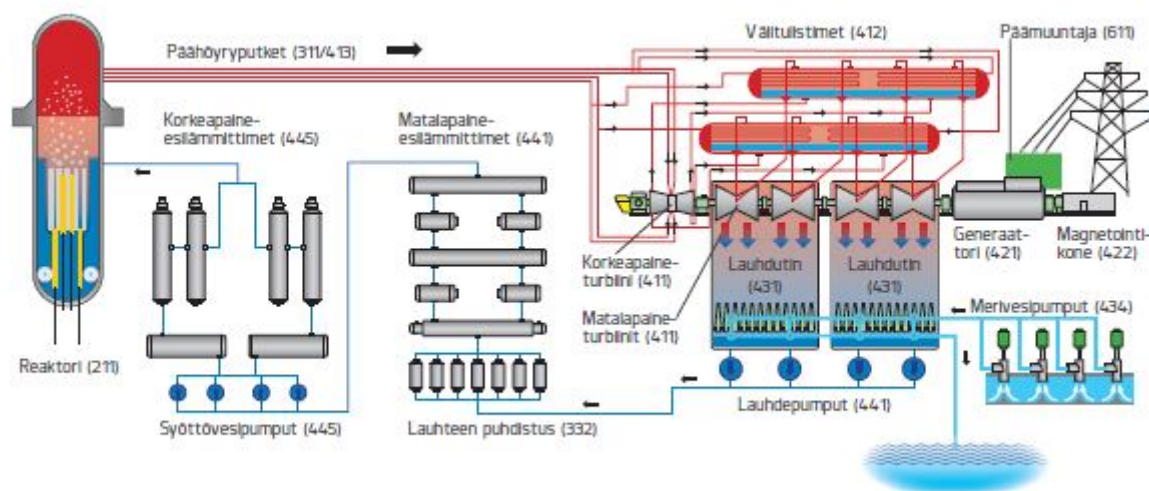
SIMULATE-3n kaksiryhmäteoriaan pohjautuvassa QPANDA-mallissa on puutteita, kun reaktorissa ilmenee suuria vesireikiä eli polttoaine-elementeistä tyhjiä positioita. Tällöin laskentajärjestelmä kaatuu. Tällainen tilanne on näin ollen laskettava käyttämällä SIMULATEn puolitoistaryhmäteoriaan perustuvaa RFSDM mallia, jolla ei päästä yhtä tarkkoihin tuloksiin. TVO:lla kehitteillä oleva uusi laskentajärjestelmä, MKOALA, ottaa vesialueet huomioon, jolloin laskentatarkkuus ja oikeellisuus paranevat. MKOALA on kaksiryhmäteoriaan perustuva diffuusiolaskentajärjestelmä. Lähtötietoina ohjelma käyttää SIMULATEn laskemia prosessiarvoja, joiden avulla ohjelmalla voidaan laskea efektiiviset kasvutekijät kaksi- tai kolmiulotteisesti.

## 1.1 Olkiluodon kiehumisvesireaktoreiden kuvaus

Teollisuuden Voima Oyj:n Olkiluodossa sijaitsevat kiehumisvesireaktori (BWR, Boiling Water Reactor) ydinvoimalaitosyksiköt Olkiluoto 1 (OL1) ja Olkiluoto 2 (OL2) ovat identtisiä. Molempien laitosten nykyiset nettosähkötehot ovat 880 megawattia (MW) ja reaktorien lämpötehot 2500 MW. Laitosyksiköt ovat ruotsalaisen AB Asea Atomin toimitamia. Lisäksi TVO:lla on rakenteilla nettosähköteholtaan 1600 MW:n painevesireaktori (PWR, Pressure Water Reactor) ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3 (OL3). (OL1&OL2 Ydinvoimalaitosyksiköt 2013. 9)

Kiehumisvesilaitosten toimintaperiaate ja virtauskaavio on esitetty kuvassa 1. Kiehumisvesilaitosten tärkeimmät komponentit ovat reaktori, turbiini, generaattori ja lauhdutin.

Vettä kierrätetään reaktorissa reaktorisydämen polttoainepuissa olevien polttoainesau-



Kuva 1: OL1- ja OL2-laitosyksiköiden virtauskaavio (OL1&OL2 Ydinvoimalaitosyksikö 2013. 9)

vojen välissä, jolloin vesi kuumenee ja höyrystyy. Ennen höyryn johtamista turbiinilaitokselle, höyryn kosteuspitoisuutta vähennetään reaktorissa johtamalla höyry höyrynerotimen ja höyrynkuivaimen läpi. Tämän jälkeen höyry johdetaan neljää päähöyryputkea pitkin korkeapaineturbiinille. Höyry luovuttaa osan energiastaan korkeapaineturbiinissa, jonka jälkeen se johdetaan välitulistimelle kuivausta ja tulistamista varten. Tämän jälkeen höyry johdetaan matalapaineturbiinille. Kaikki turbiinit pyörittävät samalle akselille kytkettyä generaattoria, joka tuottaa sähköä valtakunnan verkkoon. Matalapaineturbiineilta tuleva höyry johdetaan lauhduttimeen, jossa se lauhtuu vedeksi merivesijäähdytyspiirin avulla. Lauhdevesi pumpataan puhdistusjärjestelmän ja lauhteen esilämmittimien kautta syöttövesipumpuille, jotka pumpaavat sen syöttövetenä esilämmittimien kautta takaisin reaktoriin. Lämmennyt merivesi johdetaan takaisin mereen. (OL1&OL2 Ydinvoimalaitosyksiköt 2013. 9, 16)

Polttoaineena kiehausvesireaktoreissa käytetään uranidioksidia, joka on väkevöity fissiilin U-235 suhteen 3-5 prosenttiseksi. Polttoaineesta on valmistettu pieniä sintrattuja tabletteja, jotka on pakattu seostetusta zirkoniummetallista valmistettuihin kaasutiiviisiin putkiin. Nämä polttoainesauvat tuetaan nipuiksi välituilla ja päätylevyillä. Polttoaineniput ovat polttoainekanaavissa, jotka ohjaavat jäähdytysveden virtauksen polttoainesauvojen ympärille. Jokaisessa polttoainenipussa on polttoainetyypin mukaan noin 100 polttoainesauvaa. OL1:n ja OL2:n reaktorisydämissä on 500 polttoainenipusta ja -kanavasta koostuvaa polttoaine-elementtiä. Polttoaineniput on jaettu neljän nipun ryhmiin, joita kutsutaan supeselleiksi tai sydänmoduleiksi. (OL1&OL2 Ydinvoimalaitosyksiköt 2013. 18)

Jokaisen supersellin keskellä on ristinmuotoinen säätösauva, jolla hallitaan reaktorisydä-

men reaktiivisuutta. Reaktiivisuus kuvaa neutronien ja fissioiden määrän muutosta sekä tehokehitystä. OL1:llä ja OL2:lla säätösauvoja on 121 kappaletta, ja niitä hallitaan painestian alla olevilla toimilaitteilla. Neutroneita kaappaavana absorbaattoriaineena säätösauvoissa käytetään boorikarbidia ( $B_4C$ ) ja hafniumia (Hf). Reaktiivisuuden säädön lisäksi säätösauvoja käytetään tehojakauman muokkaamiseen ja reaktorin tehonsäätöön sekä reaktorin nopeaan sammuttamiseen pikasulussa. Säätösauvoilla reaktorin tehoa säädetään noin 60 prosentin tehoon asti ja pääkiertopumpuilla siitä ylöspäin. Säätösauvat on jaettu 14 pikasulkuryhmään siten, että reaktiivisuuskytkennät kunkin pikasulkuryhmän sauvojen välillä ovat merkityksettömät. Toimintahäiriö yhdessä pikasulkuryhmässä merkitsee tällöin reaktiivisuusvaikutukseltaan käytännössä vain yhden säätösauvan menetystä. Säätösauvojen lisäksi reaktori saadaan sammutettua boorijärjestelmän avulla, jolloin reaktoriin pumpataan booripitoista vettä. (OL1&OL2 Ydinvoimalaitosyksiköt 2013. 20-22)

OL1:llä ja OL2:lla reaktoria käytetään vuoden jaksoissa, jolloin vaihdetaan yleisesti vapaa neljännes (noin sata) reaktorisydämen polttoaine-elementeistä kutakin jaksoa kohden. Ominaisuuksiltaan erilaiset polttoaineniput sijoitetaan reaktoriin niin, että reaktorisydämen ja polttoaineen käytölle määritellyt rajoitukset täytetään. Vaihtolatauserään kuuluville nipuille tehdään reaktorifysikaaliset mitoitus, joissa määritellään kunkin sauvan U-235-väkevöintiasteet ja palavan neutroniabsorbaattorin pitoisuudet sekä sen sijainti nipussa ottaen huomioon tulevien jaksojen pituudet. Polttoainetta käytetään reaktorissa yleensä kolmesta viiteen käyttöjaksoa. (OL1&OL2 Ydinvoimalaitosyksiköt 2013. 20)

Reaktorin tehon säätämiseen ja ylijäämäreaktiivisuuden sidontaan käytetään säätösauvoja, polttoaineen sisältämää palavaa absorbaattoria sekä pääkiertovirtauksen säätöä. Jakson alussa ylijäämäreaktiivisuus on suurimmillaan, mutta vähenee jakson käytön edetessä samalla, kun palavan absorbaattorin määrä vähenee, mikä tasoittaa reaktiivisuuden säätöön tarvittavaa säätösauvojen liikuttelua. Reaktiivisuutta vapautetaan tehoajossa vetämällä säätösauvoja pienissä askelissa ulospäin, kun palavan absorbaattorin määrä on vähentynyt tarpeeksi. Jakson lopussa kaikki säätösauvat ovat ulkona, jolloin reaktiivisuutta ylläpidetään jonkin aikaa kasvattamalla pääkiertovirtausta, kunnes reaktorin teho alkaa lopulta hitaasti laskemaan. (Ibid) Jakson lopussa reaktiivisuutta saadaan näin ollen lisää vähenevästä aukko-osuudesta eli vesihöyryn ja veden suhteesta, nestemäisen hidasteen kasvavasta tiheydestä sekä polttoaineen alentuneesta lämpötilasta.

## 1.2 Reaktorin valvonta- ja simulointiympäristö

Olkiluodon 1 ja 2 -laitosyksiköillä reaktorinvalvontaohjelmistona käytetään Studsvik Scandpowerin Core Management System -ohjelmistoa. Ohjelmiston sydänsimulaattoriohjel-



misto SIMULATE-3 on kolmiulotteinen reaktorin laskentajärjestelmä, jolla voidaan suorittaa polttoaineen käytön hallinnan tutkimista, reaktorisydämen suunnittelulaskuja sekä laskea turvallisuusparametrejä. SIMULATE-online järjestelmää käytetään reaktorisydämen valvontaan ja offline-laskennan tarkoitus on lähinnä reaktorisydämen suunnittelu ja analysointi. SIMULATE-3 käyttää lähtötietoina prosessista mitattuja suureita sekä muilta ohjelmilta saatuja tuloksia. Lähtötietojen avulla SIMULATE-3 laskee pienimmät termiset ja PCI-marginaalit (Pellet Cladding Interaction) sekä niiden sijainnit, fissiotuotteiden pitoisuudet, hydraulikkaan liittyvät suureet ja stabiilisuusparametrit. Näitä käytetään myös sulkumarginaalien määrittämiseen. SIMULATE-online -ajo käynnistyy automaattisesti tietyin väliajoin sekä merkittävimmässä prosessin tai sydämen tilan muutoksissa. SIMULATE-ajoista tallentuu arkistoon lähtötietojen arvot sekä tulokset. SIMULATE-3 laskenta tapahtuu nooditasolla. (Kaunisto 2007. 2, 6, 7)

### **1.3 Työn tavoitteet**

Tämän työn tavoitteena on vertailla TVO:lla käytössä olevia sulkumarginaalien mallinnusmalleja sekä uutta kehitteillä olevaa MKOALA-nimistä reaktorisydämen mallinnusohjelmaa. Laskentajärjestelmien vertailulla pyritään selvittämään niiden soveltuvuutta reaktorisydämen suunnittelussa sekä kehittämään sulkumarginaalien mallinnusta. Työssä esitellään sulkumarginaaleihin liittyvät keskeisimmät ilmiöt, teoriat ja vaatimukset. Lisäksi työssä selvitetään sulkumarginaalien laskentajärjestelmien eroja. Työssä ei käydä kuitenkaan läpi laskentajärjestelmien yksityiskohtaista toiminnallista kuvausta.

Uutta laskentajärjestelmää testataan laskemalla sillä menneiden jaksojen kriittisyyksiä ja vertaamalla niitä toteutuneisiin arvoihin sekä laskemalla vuoden 2016 vaihtolatauksien sulkumarginaalit ja vertaamalla tuloksia tuotannon käytössä oleviin SIMULATEn RFSDM- ja QPANDA-malleihin.

## 2 TEORIA

Sulkumarginaalien määrittämisen kannalta on oleellista tuntea peruskäsitteet reaktori-fysiikasta sekä esimerkiksi kuinka neutronit käyttäytyvät ja ketjureaktio tapahtuu. Tässä kappaleessa käsitellään näitä sekä peruslaskentateorioita, joilla ilmiöitä kuvataan.

### 2.1 Ketjureaktio

Ydinreaktoreilla energian tuottaminen hallitusti edellyttää tasaisena jatkuvaa ketjureaktiota. Vakaa ketjureaktori ydinreaktorissa vaatii, että yhden fission tuottama neutroni aiheuttaa lopulta toisen fission. Mikäli fissioiden määrä aikayksikössä pysyy vakiona, eli tasan yksi fissiossa syntynyt neutroni aiheuttaa toisen fission, niin systeemiä kutsutaan kriittiseksi. Systeemiä kutsutaan ylikriittiseksi, jos fissioiden määrä kasvaa ajan myötä eli keskimäärin useampi kuin yksi yhden fission tuottamasta neutronista johtaa toiseen fissioon. Alikriittinen systeemi tarkoittaa taas, että fissioiden määrä vähenee jolloin jokainen fissio ei johda toiseen fissioon. (Lamarsh 1972. 109) Kriittisyyttä kuvataan kasvutekijällä  $k$ , jolloin

$$\begin{aligned} k = 1 & \text{ kriittiselle,} \\ k > 1 & \text{ ylikriittiselle,} \\ k < 1 & \text{ alikriittiselle.} \end{aligned}$$

Ketjureaktion ylläpitämiseksi pitää siis saavuttaa tasapaino neutronien tuottamisessa ja katoamisessa. (Ibid) Neutroneita katoaa ja syntyy niiden vuorovaikuttaessa eri aineiden kanssa. Vuorovaikuttaminen riippuu aineominaisuuksien lisäksi neutronien (kineettisestä) energiasta, jonka ne saavat atomin fissioituessa. Se miten helposti neutroni vuorovaikuttaa tietyllä tavalla aineen ytimen kanssa riippuu aineen vuorovaikutusalasta  $\Sigma$ , joka on riippuvainen neutronin energiasta. Neutronit voivat absorboitua, sirota tai aiheuttaa fission. (Lamarsh 1972. 17-19, 34)

Neutronit jaetaan ryhmiin niiden energiatasojen mukaan. Yleisesti neutronit jaetaan nopeisiin ja hitaisiin neutroneihin, missä hitaiden neutronien energia on  $0 - 1$  eV ja nopeilla neutroneilla  $1$  eV –  $10$  MeV. Hitaita neutroneita kutsutaan myös usein termisiksi neutroneiksi. (Duderstadt 1976. 285, 286, 295)

Neutroneita syntyy pääasiassa OL1 ja OL2 laitosten kaltaisissa termisissä reaktoreissa hitaiden neutronien aiheuttamissa U-235 fissioissa. Fissioissa syntyneet neutronit ovat kuitenkin syntyessään nopeita, jolloin ne täytyy hidastaa ensin U-235 fissioiden aikaansaamiseksi. Hidastaminen toteutetaan hidastimella, jolloin neutronit törmäilevät hidastinai-

neen ytimiin luovuttaen törmäyksissä energiaansa. Tätä kutsutaan siroamiseksi. (Duderstadt 1976. 286)

Neutronit katoavat taas joko vuotamalla ulos reaktorista tai absorboitumalla. Neutronit voivat absorboitua polttoaineen lisäksi myös absorbaattoreihin, hidastimeen, jäähdyttyseen ja rakenteisiin. (Lamarsh 1972. 109, 110)

Kriittisyyttä on usein myös kätevämpi kuvata kasvutekijän rinnakkaisuureella, reaktiivisuudella  $\rho$ . Reaktiivisuudella verrataan kasvutekijän eroa kriittiseen tilaan eli kun  $k = 1$ .

$$\rho = \frac{k - 1}{k} = \frac{\Delta k}{k}. \quad (2.1)$$

Reaktiivisuuden yksiköinä käytetään usein prosenttia (%) tai pcm ( $10^{-5}$ ). (Oka 2013. 7)

## 2.2 Diffuusioteoria

Neutronien liike reaktorissa on monimutkaista siksak-liikettä, sillä neutronit törmäilevät jatkuvasti muiden ytimien kanssa. Myös neutronien energiajakauma vaihtelee paljon riipuen törmäyksistä. Ilmiön kuvaamiseksi on kehitetty kulkeutumisteoria, jota kuvaa tarkka Boltzmannin yhtälö. Yhtälön ratkaiseminen on kuitenkin vaikeaa, minkä takia onkin yleisempää tarkastella käytännön ratkaisuissa diffuusioteoriaa (Lamarsh 1972. 118). Diffuusioteorian merkittävimpiä yksinkertaistuksia on Fickin lakina tunnettu kemiallisen diffuusion selitysmalli, jossa ainetta pyrkii siirtymään väkevämmästä konsentraatiosta laimeampaan diffuusiolla. Neutronien nettovirtauksen  $\bar{J}$  oletetaan myös teorian mukaan menevän nyt alueelta, jossa on neutroneja tiheämmin eli neutronivuo  $\phi$  on suurempi, pienemmän neutronivuon suuntaan. Nettovirtauksen tulosuunnalta siroaa tällöin enemmän neutroneja tulosuunnasta menosuuntaan. (Jevremovic 2009. 379-381) Kolmiulotteisessa tapauksessa neutronivirta kuvataan neutronivuon muutoksena seuraavasti:

$$\bar{J} = -D\nabla\phi, \quad (2.2)$$

missä diffuusiokerroin  $D$  on vaikutusaloista johtuva verrannollisuuskerroin.

Säilymisyyhtälöt ovat myös hyviä erilaisten tilanteiden tarkasteluun. Neutronien säilymisyyhtälö kuvataan seuraavasti:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = s - \Sigma_a\phi - \nabla\bar{J}, \quad (2.3)$$

missä  $\frac{\partial n}{\partial t}$  neutronien lukumäärän muutos, ajan muutos,  
 $s$  syntyvien neutronien määrä aika- ja tilavuusyksikössä,  
 $\Sigma_a$  absorbtio vaikutusala.

Yhtälössä oikealla puolella ensimmäinen termi kuvaa neutronien syntymistä, toinen termi neutronien 'häviämistä' absorboitumalla ja viimeinen termi neutronien vuotoa tarkastelu pinnan yli. (Oka 2010. 71)

Sijoittamalla Fickin laki säilymisyhtälöön ja olettamalla kaikkien neutronien olevan monoenergisiä eli samalla energiatasolla, jolloin  $D$  ei riipu paikasta ja oletetaan olevan vakio, saadaan (Oka 2010. 72)

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla \cdot D \nabla \phi - \Sigma_a \phi + s, \quad (2.4)$$

Tämä tunnetaan yksiryhmäteorian diffuusioyhtälönä. Tasapainotilanteen diffuusioyhtälö saadaan kun neutronivuon aikaderivaatta on nolla. Avataan vielä neutronien syntymistermi  $s$  neutronivuon ja vaikutusalojen avulla niin yhtälö saadaan muotoon

$$D \nabla^2 \phi - \Sigma_a \phi + \nu \Sigma_f \phi = 0, \quad (2.5)$$

missä  $\nu$  syntyvien nopeiden neutronien keskiarvo fissiota kohti,  
 $\Sigma_f$  fissiovaikutusala.

Diffuusioyhtälö esitetään useasti muodossa, jossa yhtälö on jaettu absorptiovaikutusallalla  $\Sigma_a$  (Lamarsh 1972. 261)

$$L^2 \nabla^2 \phi - \phi + \frac{\nu \Sigma_f \phi}{\Sigma_a} = 0, \quad (2.6)$$

missä  $L^2 = \frac{D}{\Sigma_a}$  on diffuusioala ja  $L$  on vastaavasti diffuusio pituus.

Diffuusioyhtälö on aproksimaatio, joka pätee vain jos neutronivuo ei muutu jyrkästi. Jyrkkiä neutronivuon muutoksia esiintyy yleensä ulkoisten rajapintojen ja absorbaattoreiden lähellä. (Lamarsh 1972. 133-135)

### 2.3 Kaksiryhmäteoria

Kaksiryhmäteorian perustana on moniryhmäteorian diffuusioyhtälö, joka on johdettu useissa alan eri teoksissa. Peruseriaate moniryhmäteoriassa on kuitenkin sama kuin yksiryhmäteorian diffuusioyhtälössä mutta nyt pitää huomioida, että neutroneita esiintyy usealla eri energiatasolla ja niiden energiatasot muuttuvat siroamalla (Duderstadt 1976. 285, 286, 294),

$$\Sigma_{g,t} \phi_g + \nabla \cdot \bar{\mathbf{J}}_g = \sum_{g' \neq g} \Sigma_{g' \rightarrow g} \phi_{g'} + \frac{1}{k} \chi_g \sum_{g'} \nu_{g'} \Sigma_{g',f} \phi_{g'}, \quad (2.7)$$

$$\sum_i \chi_i = 1,$$

|       |                             |  |
|-------|-----------------------------|--|
| missä | $\Sigma_{g,t}$              | ryhmän g makroskooppinen kokonaisvaikutusala sisältäen absorptiot ja sironnan, |
|       | $\phi_g$                    | ryhmän g neutronivuo,  |
|       | $\bar{\mathbf{J}}_g$        | ryhmän g neutronivirta,  |
|       | $\Sigma_{g' \rightarrow g}$ | makroskooppinen sironnan vaikutusala ryhmästä g' ryhmään g,                    |
|       | k                           | kasvutekijä,   |
|       | $\chi_g$                    | neutronin todennäköisyys syntyä ryhmään g,                                     |
|       | $\Sigma_{g',f}$             | ryhmän g makroskooppinen fissiovaikutusala.                                    |

Yhtälössä  $\Sigma_{g,t}\phi_g$  kuvaa ryhmän g neutronien häviämistä sironnan ja absorption vaikutuksesta,  $\nabla \cdot \bar{\mathbf{J}}_g$  kuvaa neutronien vuotoa tarkastelu pinnan yli ja yhtälön oikea puoli kuvaa neutronien syntymistä ryhmään g. Neutroneita tulee ryhmään g siroamalla ryhmästä g'  $\sum_{g' \neq g} \Sigma_{g' \rightarrow g} \phi_{g'}$  sekä fissioiden seurauksena  $\frac{1}{k} \chi_g \sum_{g'} \nu_{g'} \Sigma_{g',f} \phi_{g'}$ .

Yhtälö muokataan kaksiryhmäteoriaa vastaavaksi rajoittamalla neutronit kahteen ryhmään: nopeisiin ja hitaisiin neutroneihin. Molemmille ryhmille laaditaan yhtälön 2.7 mukaiset yhtälöt. Hitaan ryhmän energiataso valitaan tarpeeksi suureksi niin että ylöspäinsironta voidaan jättää huomiotta sekä oletetaan kaikkien fissioneutronien syntyvän nopeaan ryhmään jolloin  $\chi_1 = 1$  ja  $\chi_2 = 0$ . Tällöin voidaan olettaa ettei nopeaan ryhmään synny neutroneita siroamalla ja hitaaseen ryhmään neutroneita syntyy taas vain siroamalla nopeiden neutronien ryhmästä (Duderstadt 1976. 295-297). Nyt jää jäljelle kahden yhtälön yhtälöryhmä.

$$(\Sigma_{1,a} + \Sigma_{1 \rightarrow 2,s})\phi_1 + \nabla \cdot \bar{\mathbf{J}}_1 = \frac{1}{k}(\nu_1 \Sigma_{1,f} \phi_1 + \nu_2 \Sigma_{2,f} \phi_2) \quad (2.8)$$

$$\Sigma_{2,a} \phi_2 + \nabla \cdot \bar{\mathbf{J}}_2 = \Sigma_{1 \rightarrow 2,s} \phi_1 \quad (2.9)$$

missä  $\Sigma_{1 \rightarrow 2,s}$  sironnan makroskooppinen vaikutusala.

Uusi laskentamalli, MKOALA, ja SIMULATE:n tarkempi QPANDA käyttää laskennassaan kaksiryhmäteoriaa. Laskentamalleissa reaktorisydän on jaettu polttoaine-elementtien mukaan noodeihin, joiden oletetaan olevan homogeenisiä. Homogeenisessä väliaineessa aineominaisuudet, kuten vaikutusalat, eivät riipu paikasta, joten tilannetta voidaan käsitellä separoituvasti kussakin noodissa.

## 2.4 Puolitoistaryhmäteoria

Puolitoistaryhmäteoriassa rajoitetaan diffuusioyhtälöt yhteen muuntamalla kaksiryhmäteorian nopeiden neutronien ryhmän yhtälöä. Yleisesti hitaiden neutronien absorbtiovaiku-

tusala on huomattavasti isompi kuin nopeiden, jolloin  $D_2 \ll D_1$ . Tällöin voidaan jättää  $D_2$  huomiotta yhtälössä 2.8, jolloin hitaiden neutronien vuo voidaan esittää  $\phi_2 = (\Sigma_{1 \rightarrow 2} / \Sigma_{2,a}) \phi_1$ , jolloin saadaan yksiryhmä diffuusioyhtälö nopeille neutroneille (Stacey 2007. 129)

$$(\Sigma_{1,a} + \Sigma_{1 \rightarrow 2,s}) \phi_1 - \nabla \cdot D_1 \nabla \phi_1 = \frac{1}{k} \left( \nu_1 \Sigma_{1,f} + \nu_1 \Sigma_{2,f} \frac{\Sigma_{1 \rightarrow 2,s}}{\Sigma_{2,a}} \right) \phi_1. \quad (2.10)$$

Lisäksi hitaiden neutronien diffuusio otetaan huomioon käyttämällä efektiivistä diffuusio-kerrointa

$$D_{1,\text{eff}} = D_1 + \frac{\Sigma_{1,a} + \Sigma_{1 \rightarrow 2,s}}{\Sigma_{2,a}} D_2. \quad (2.11)$$

Tämä vastaa diffuusio pituuden korvaamista migraatio pituudella  $M$  eli

$$L_1^2 \rightarrow M^2 = \frac{D_1}{\Sigma_{a,1}} + \Sigma_{1 \rightarrow 2,s} \frac{D_2}{\Sigma_{a,2}}. \quad (2.12)$$

Vastaavasti yksiryhmäteorian diffuusioyhtälö 2.5 voidaan muuntaa puolitoistaryhmä teoriaa vastaavaksi korvaamalla  $\nu_1 \Sigma_{1,f} \rightarrow \nu_1 \Sigma_{2,f} (\Sigma_{1 \rightarrow 2,s} / \Sigma_{2,a})$  ja  $D \rightarrow D_{1,\text{eff}}$  tai korvaamalla  $L_1^2 \rightarrow M^2$

SIMULATEN sisältämä nopea RFSDM-malli käyttää laskennassaan puolitoistaryhmäteoriaa. Myös tässä mallissa laskenta on noodipohjaista, mutta laskenta on huomattavasti nopeampaa, koska neutronivirtoja ei tarvitse laskea kahdelle ryhmälle rajapinnoilla.

### 3 SULKUMARGINAALI

Sulkumarginaalien perusvaatimuksena on, että reaktori voidaan sammuttaa ja saada alkriittiseksi reaktiivisuuden säätöjärjestelmällä. Reaktorin sammuttaminen ja alkriittiseen tilaan ajaminen tarkoittaa, että neutronien tuotto vähenee ja näin ollen saa tapahtua ai-noastaan merkityksetöntä energiankehitystä neutronien aiheuttamista fissioista. (Laakso-nen 2016b. 7, 8)

#### 3.1 Sulkumarginaalivaatimukset

OL1:n ja OL2:n TTKE:ssä (3.3 C) määritellään, että reaktorisydän on voitava saattaa mis-sä tahansa käyttöjakson tilassa varmasti alkriittiseksi, vaikka mihin tahansa yhteen pika-sulkuryhmään kuuluvat säätösauvat ovat kokonaan ulkona reaktorisydäimestä. Ehto pätee myös vaihtolatauksen aikana, jolloin toimilaittehuolloista tai säätösauvavaihdoista johtuen reaktorisydäimestä saattaa olla jo valmiiksi yksi säätösauva ulkona. Reaktorisydäntä ei saa saattaa kriittiseen tilaan ennen kuin sen sulkumarginaalit on todettu riittäviksi. (Laakso-nen 2016a. 30, 31)

Käyttökuntoisuusvaatimuksissa vaaditaan, että reaktorisydämen suunniteltu laskettu sul-kumarginaali kylmän tilan referenssitason nähden on oltava vähintään yksi reaktiivisuus-prosentti, kun sydän on ksenon-myrkytön ja lämpötilassa, jolla on mahdollista saavuttaa korkein reaktiivisuus. Sulkumarginaali on laskettava niin, että oletetaan reaktiivisimman pikasulkuryhmän säätösauvat olevan kokonaan ulkona sydäimestä. (Ibid) Ohjelmistot las-kevat jokaisen pikasulkuryhmän tai jokaisen säätösauvan ja vertaavat millä on suurin reak-tiivisuusvaikutus

Ennen reaktorin käynnistämistä sydänmuutoksen jälkeen sulkumarginaali on todettava riittäväksi myös mittaamalla niin sanotuilla kylmäkriittisyyskokeilla. Kylmäkriittisyysko-keiden mittausten avulla saatu sulkumarginaali on riittävä mikäli se on vähintään puoli reaktiivisuusprosenttia korkeimman reaktiivisuuden antavassa lämpötilassa määritettyyn reaktiivisuuden referenssitason nähden. (Ibid) Referenssitasona sulkumarginaalilaskuis-sa käytetään edellisen kriittisyyskokeen antaman kriittisen säätösauvakuvion reaktorin kasvutekijää kylmässä tilassa.

Käyttöjakson aikana eli kuumassa tilassa (jäähdytteen lämpötila 286 °C) sulkumarginaali on riittävä, kun laskettu marginaali on vähintään yksi reaktiivisuusprosentti kuman ti-lan referenssitason nähden, vaikka pikasulkutoiminnan osalta käyttökunnottomat säätä-sauvat jäävät asentoonsa ja reaktiivisimman pikasulkuryhmän säätösauvat ovat kokonaan

ulkona reaktorista. (Ibid)

### 3.2 Sulkumarginaalin määrittäminen

TVO:lla sulkumarginaalin (SDM) laskennassa käytetään seuraavaa määritelmää.

$$SDM = \frac{k_{\text{ref}} - k_{\text{eff}}}{k_{\text{eff}}} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

missä  $k_{\text{ref}}$  referenssitason kasvutekijä,  
 $k_{\text{eff}}$  laskettu kasvutekijä, kun ensimmäinen säätösauva tai pikasulkuryhmä täysin ulosvedettynä.

Sulkumarginaalille on myös muita määritelmiä käytössä. Esimerkiksi SIMULATE laskee oletuksena sulkumarginaalit edellisen kaltaisella yhtälöllä mutta yhtälö jaetaan efektiivisen kasvutekijän sijaan referenssi kasvutekijällä. TTKE:n mukaan ennalta lasketun reaktiivisuuden  $\rho$  tulee olla pienempi kuin -0,01.

$$\rho = 1 - \frac{1}{k_{\text{eff}}} = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}} \leq -0,01 \quad (3.2)$$

Teoriassa kriittiselle reaktorille kasvutekijä  $k_{\text{ref}} = 1$ . Kriittisyyskokeiden avulla todetun kriittisen reaktorin kasvutekijä poikkeaa kuitenkin usein sydänsimulaattoriohjelman laske-  
 mana arvosta 1, jolloin saadaan

$$\frac{k_{\text{eff}} - k_{\text{ref}}}{k_{\text{eff}}} \leq -0,01 \quad (3.3)$$

tai

$$\frac{k_{\text{ref}} - k_{\text{eff}}}{k_{\text{eff}}} \geq 0,01 \quad (3.4)$$

Referenssikriittisyytenä sulkumarginaali laskuissa käytetään edellisen jakson kriittisyyskokeiden kriittisyyttä. (Kalliokorpi 2013. 4, 5)

### 3.3 Reaktiivisuuteen vaikuttavat tekijät

Reaktorin tehonmuutokset vaikuttavat polttoaineen, jäähdytteen ja hidastimen lämpötiloihin, mikä taas vaikuttaa reaktiivisuuteen. Polttoaineen lämpötila vaikuttaa polttoaineen resonanssi absorptioihin eli absorptioihin suurimman absorptiovaikutusalan alueel-



la Doppler-ilmiöllä. Tällöin lämpötilan kasvaessa lämpöliike kasvaa, jolloin resonanssi absorptiovaikutusalan piikki tasaantuu ja paksuuntuu.

Hidastimen lämpötilan kasvaessa sen tiheys pienenee, jolloin sen kyky hidastaa neutroneita myös pienenee, sillä neutronien todennäköisyys törmätä hidastimeen pienenee. Tämä pienentää taas reaktiivisuutta mikäli reaktori on negatiivisesti takaisin kytketty eli suunniteltu niin, että hidaste/polttoaine -suhteen pienentyessä reaktiivisuus pienenee, sillä neutronit eivät päädy niin helposti U-235:n fissioitumisen suotuisalle hitaiden neutronien alueella. (Oka & Suzuki 2013. 24-30) Mikäli kriittisyyskokeissa hidastimen lämpötila poikkeaa 25 °C lämpötilasta, reaktiivisuutta korjataan konservatiivisella  $dk/dT$  kertoimella, joka voi olla luokkaa -5 pcm/°C. Lämpötila vaikuttaa reaktiivisuuteen myös materiaalien erilaisen lämpölaajenemisen seurauksena. Goemetrian muutokset vaikuttavat vaikutusaloihin, jotka vaikuttavat taas reaktiivisuuteen. (Oka & Suzuki 2013. 24, 25) Resonanssiabsorbtioiden ja lämpölaajenemisen vaikutus reaktiivisuuteen jätetään kuminkin laskuissa huomioitta, koska sen vaikutus on erittäin pieni mielenkiintoisella lämpötila-alueella verrattuna hidasteen tiheydenmuutoksen vaikutuksiin (Paajanen 2016).

Palama tarkoittaa tuotetun energian suhdetta polttoaineen kulumiseen. Palaman aiheuttamat muutokset reaktiivisuudessa johtuvat pääasiassa U-235 ehtymisestä ja Pu-239 muodostumisesta. (Oka 2010. 8) Palamakorjaus pitää tehdä mittaustuloksilla määritellyille sulkumarginaaleille, mikäli mittaustilanne ei ole käyttöjakson vaihe, jossa sydämen suunnittelussa laskettu sulkumarginaali on pienimmillään. Tuoreen polttoaineen sisältämän palavan myrkyä ja palamakehityksestä johtuen sulkumarginaali ei ole välttämättä pienimmillään käyttöjakson alussa, jossa se yleensä mitataan. (Kalliokorpi 2013. 5) Palamakorjaukset saadaan SIMULATEN datakirjaston lähtötiedoista.

Reaktiivisuusmyrkyllä, ksenonilla, on korkea absorptiovaikutusala ja pienentää näin ollen reaktiivisuutta. Tehonlaskuissa ksenonpitoisuus kasvaa vuon laskiessa, koska ksenonin poistuma absorptiolla pienenee ja jodipitoisuus, josta ksenonia muodostuu, on usein vielä korkealla. Tämä johtaa reaktiivisuuden ja tehon laskuun edelleen. Ksenon kuluu pois neutroniabsorption ja radioaktiivisen hajoamisen myötä. Ksenonpitoisuuden tasoittuminen vie kumminkin runsaasti aikaa, sillä I-135 kahdentumisaika on suhteellisen pitkä. Reaktorin sammuttamisen jälkeen ksenonpitoisuus lähtee laskemaan vasta noin 10 tunnin kuluttua sammuttamisesta. (Lamarsh 1972. 467-472) Vuosihuollon aikana ksenon ehtii käytännössä hajota pois ja reaktori on ksenonvapaa vuosihuollon jälkeisessä kylmäkriittisyyskokeissa. Sulkumarginaalia määritettäessä käyttöjakson aikana, jolloin sydän ei ole ksenonvapaa, tulee mahdollinen ksenonpitoisuus ottaa huomioon. (Kalliokorpi 2013. 5) Ksenonpitoisuuden korjaukset saadaan myös SIMULATEN datakirjaston lähtötiedoista, kun sammutusaika tunnetaan.

SDM-laskut tehdään yleensä käytännön syistä yksittäisille säätösauvoille. Eräiden samaan pikasulkuryhmään kuuluvien yksittäisten säätösauvojen välinen reaktiivisuuskyskyntä voi olla kuitenkin huomattava. Reaktiivisuuskyskyntän takia laskuille on syytä aina tehdä myös tarkastuslasku QPANDAlla rajoittavimmalle tilanteelle, jossa kaikki kyseisen pikasulkuryhmän säätösauvat ovat ulosvedettyinä. (Kalliokorpi 2013. 5) MKOALAlla ei ole mahdollisuutta tällä hetkellä laskea sulkumarginaaleja säätösauvaryhmittäin.

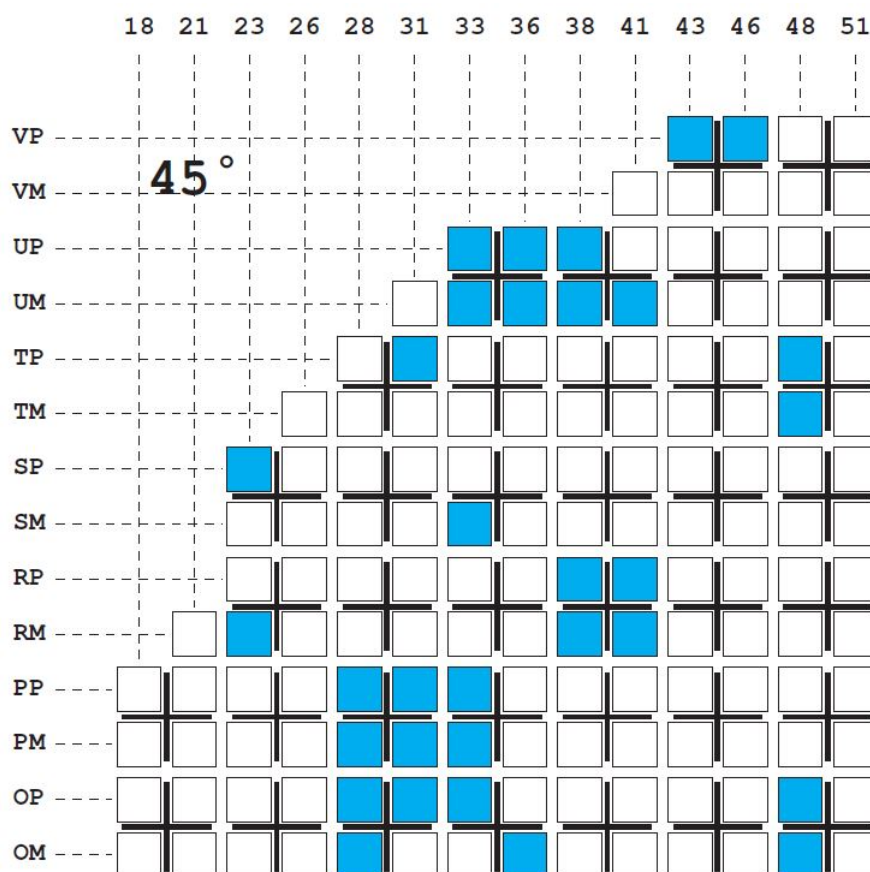
## 4 SULKUMARGINAALIN MALLINTAMISOHJELMIEN OMINAISUUKSIA

Laskentajärjestelmältä vaaditaan suurta tarkkuutta sekä luotettavuutta. Laskennan olisi hyvä olla myös nopeaa. Sulkumarginaalien mallintamisen tarkkuuteen vaikuttavat olennaisesti mallien käyttämät matemaattiset mallit. MKOALA, QPANDA ja RFSDM käyttävät jokainen noodimenetelmää, jossa globaali neutronivuon jakauma kuvataan pienellä määrällä muuttujia jokaisessa noodissa, joihin reaktori on jaettu. Noodin sisäisillä heterogeenisillä alkuarvoilla määritetään homogeeniset parametrit jokaiselle noodille. Näillä parametreilla saadaan laskettua kytkentäparametrit, joilla yhdistetään vierekkäisten noodien keskimääräiset vuot.(Stacey 2007. 541) Noodi pohjaisia menetelmiä erottaa useinmiten juuri, miten noodien pintojen virrat määritellään (Stacey 2007. 544). Oleellista on, että vuot pysyvät jatkuvina myös rajapinnoilla (Smith 1985. 310-313).

### 4.1 SIMULATE-3:n QPANDA- ja RFSDM-mallit

Vaihtolatauksien aikana on huomioitava jokainen siirtovaihe. Vuosihuoltojen vaihtolatauksissa on tyypillisesti noin 600-750 siirtoa, joille jokaiselle tulisi tehdä jokaisen säätösauvan mukaan 122 kokosydänlaskua. SIMULATE-3:n QPANDAlla tämä vie useita tunteja ja siirtojen suunnittelu on iteratiivista laskentatyötä, joten paljon aikaa vievä laskenta ei ole mielekästä. QPANDAn laskentamallissa on myös puutteita, sillä se on suunniteltu täyteen ladatun reaktorin laskentaan, jolloin polttoaineesta tyhjät vesialueet vääristävät laskua. Mallissa reaktorin reunat päätellään fissiovuorovaikutusaloista, jolloin reuna-alueiden tyhjentyminen saattaa pienentää laskennallista reaktorin kokoa. Lisäksi jos reuna-alueilla esiintyy kolmen vierekkäisen position vesireikä, jonka molemminpuoli on polttoainetta, niin lasku kaatuu. Vesialueiden keskelle jääviä säätösauvoja ei myöskään huomioida ja ohjelma kaatuu yhtenäisistä vesialueista (3x3) reaktorin keskellä mikäli tyhjällä positiolla ei ole yhtään polttoainepippua vieressä tai kulmissa 'seinänaapurina' kuten kuvan 2 tapauksessa. Osaa näistä ongelmista voidaan kiertää korvaamalla jokin tyhjästä positioista laskuissa polttoaineettomalla dummy-elementillä, jolle annetaan pieni fissiovuorovaikutus. Tosin myös tällä menetelmällä saatujen tulosten oikeellisuus on kyseenalaista. (Paajanen 2016)

Sulkumarginaalit on myös mahdollista laskea nopeammalla RFSDM-mallilla. Mallin käyttämä puolitoistaryhmäteorian tarkkuus ei ole kuitenkaan oletetusti yhtä hyvä. Toisaalta RFSDM-laskenta on hyvin varmatoiminen ja konvergoi ehdoitta. Mallin tarkkuutta voidaan parantaa lisäämällä kulkeutumismallin avulla saadut epäjatkuuustekijäkorjausker-



Kuva 2: Esimerkkitalanne vaihtolatauksen ajalta, missä QPANDA-laskenta kaatuisi rivillä UM neljään vierekkäiseen vesireikään reunalla sekä PM 31 ympärillä olevaan tyhjään vesialueeseen.

toimia neutronivirroille. Mallin tarkkuutta ei tunneta kumminkaan kovin hyvin ja rajoittavimmalle lataussiirrolle on tästä syystä tehtävä tarkistuslasku QPANDAlla. (Ibid)

## 4.2 MKOALA

Nykyisten tuotannossa käytössä olevien sydämensimulointiohjelmien ongelmia on pyritty korjaamaan kehittämällä uusi laskentaohjelma MKOALA. Laskentaohjelmalla pyritään parempaan tarkkuuteen kuin RFSDM-malli käyttämällä kaksiryhmäteorian diffuusioyhtälöä. Ohjelmaan reaktorin dimensiot määritellään manuaalisesti ja laskentamatriisikopit eli noodit eivät vaadi fissiovuorovaikutusaloja, jolloin ohjelma ei kaadu vaikka reaktorissa esiintyisi suuriakin vesialueita. Lisäksi diffuusioyhtälön iteraatiota on pyritty optimoimaan, niin että laskenta on nopeampaa kuin QPANDA-mallissa. Laskut voi suorittaa joko nopeammalla kaksikulotteisella tai enemmän laskenta-aikaa vievällä kolmiulotteisella sulukumarginaalien mallinnuksella. MKOALAn malli perustuu Kord Smithin (1985) noodilaskentamenetelmiin diffuusioyhtälöille. (Paajanen 2016) Matemaattinen malli on esitetty

liitteessä 1.

MKOALAssa reaktorisydän jakautuu laskentanoodeihin, joiden koko määräytyy polttoaine-elementtien mukaan kylmässä tilassa (25 °C). Sulkumarginaalien lähtötietoina laskennassa käytettävät kriittisyysmittaukset tehdään kuitenkin yleisesti noin 40 °C lämpötiloissa, jolloin noodien koko olisi suurempi lämpölaajenemisesta johtuen. Lämpölaajenemisen vaikutus sulkumarginaaleihin noin 40 °C lämpötilassa on kuitenkin alle 5 pcm. Näin ollen lämpölaajenemisen vaikutus on merkityksettömän pieni ja voidaan jättää laskuissa huomioitta.

## 5 SULKUMARGINAALIEN LASKENTA SYDÄMEN-SIMULOINTIOHJELMILLA

TVO:n ohjeiden mukaan polttoaineen käytönsuunnitteluun liittyvät laskut tulee tehdä tarkoitukseen suunnitelluilla, kelpoistetuilla ja testatuilla tietokoneohjelmilla (Nurminen 2011. 3). Ohjelmien kelpoistaminen tehdään ajamalla ohjelman normaalia käyttöä edustavat TVO:n omat testitapaukset sekä vertaamalla tuloksia ohjelman sen hetkisellä tuotantoversiolla saataviin tuloksiin. Tarkoituksena on varmentaa, että myös uusi järjestelmä on käyttöön sopiva ja että erot versioiden välillä ovat pieniä, selitettävissä ja mahdollisesti parantavat tuloksien tarkkuutta. Vertailu tehdään vakiintuneesti usein laskemalla molempien laitosten koko käyttöhistoria uudelleen. (Hynönen 2016. 2, 7). Laskuissa on huomioitava käyttöhistorian aikana laitoksille tehdyt modernisoinnit.

MKOALA on uusi reaktorisydämen mallinnusohjelma eikä sille ole käytössä olevaa tuotantoversiota. Kelpoistamisessa sovelletaan näin ollen vertaamalla tuloksia muiden käytössä olevien ja kelpoistettujen ohjelmien tuloksiin, eli SIMULATEn RFSDM- ja QPANDA-malleihin. Tulosten kannalta on oleellisempaa verrata tuloksia QPANDAn tuloksiin, sillä se perustuu kaksiryhmäteoriaan, mikä antaa oletetusti tarkempia tuloksia. RFSDM-malliin on myös mielekästä verrata tuloksia, sillä se on käytännön syistä enemmän käytetty tuotannossa, etenkin reaktorisydämen suunnittelussa.

Seuraavissa kappaleessa käydään läpi kelpoistamista varten MKOALA:lla lasketut menneiden jaksojen kylmäkriittisyydet sekä 2016 vaihtolatauksien aikaiset sulkumarginaalit molemmilla laitoksilla.

### 5.1 Menneiden jaksojen sulkumarginaalien laskenta

MKOALAlla laskettiin vakiintuneiden kelpoistus menettelyjen mukaan menneiden jaksojen aikaiset sulkumarginaalit molemmilta laitoksilta (OL1 ja OL2) käyttämällä lähtötietoina kylmäkriittisyydsmittauksista SIMULATElta saatuja lähtötietoja. OL1:llä MKOALAlla lasketut kriittisyydet olivat keskimäärin 303 pcm suuremmat kuin mittauksien arvot hajonnan ollessa 70 pcm. OL2:lla kriittisyys oli keskimäärin 322 pcm suurempi hajonnan ollessa 70 pcm.

Ero on suhteellisen suuri, sillä noin 300 pcm kriittisyyden kasvu vastaa 0,3 % pienempää sulkumarginaalia mikäli referenssikasvutekijän oletetaan pysyvän samana. Sulkumarginaaleja tulee laskea kuitenkin käyttäen referenssikasvutekijänä samalla ohjelmistolla saatua edellisen vuoden kriittistä kasvutekijää. Kriittisyyksien eron hajonta oli tulosten pe-

rusteella kuitenkin pieni, jolloin suurehko kriittisen kasvutekijän ero MKOALAn ja mittauksien välillä ei vaikuta paljoa sulkumarginaaleihin.

## 5.2 R116:n ja R216:n vaihtolatauksen aikaiset sulkumarginaalit

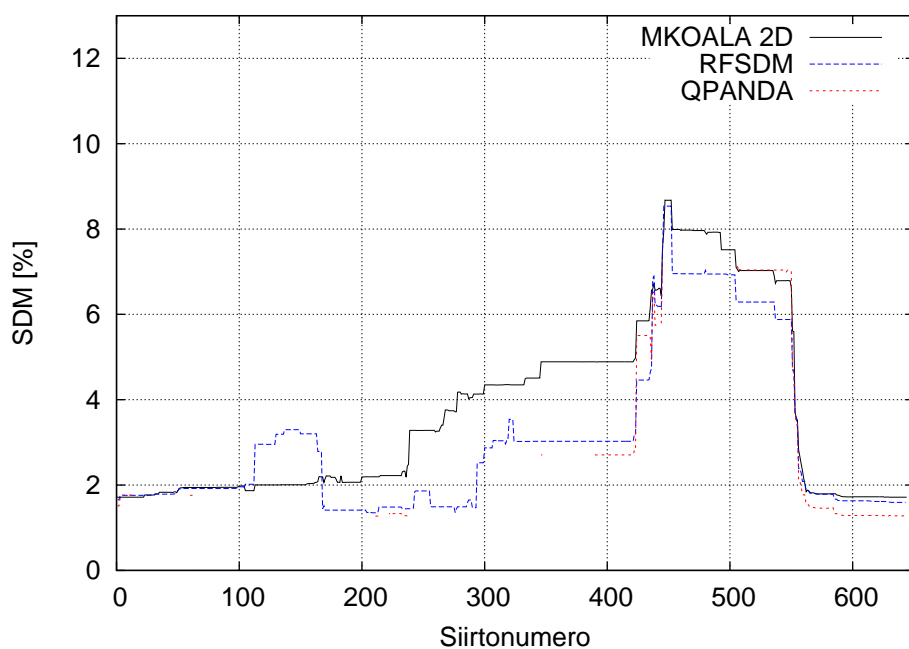
Sulkumarginaalien mallintamisessa esiintyy ongelmia vaihtolatauksessa etenkin, kun reaktorissa esiintyy suuria vesireikiä. Tästä syystä sulkumarginaali malleja on erityisen tärkeää verrata vaihtolatauksissa. Vaihtolatauksessa on laskettava sulkumarginaalit jokaisen siirron jälkeen jokaiselle säätösauva positiolle. Näiden laskujen avulla saadaan määritettyä rajoittavin sulkumarginaali ja sen sijainti jokaisen siirron aikana. Mikäli ennakkolaskuissa saatu SDM alittaa jonkin siirron aikana TTKE:n määrittelemän yhden reaktiivisuusprosentin, on siirtosuunnitelmaa muutettava niin, että sulkumarginaali pysyy sallituissa rajoissa koko ajan.

Sulkumarginaalimalleja vaihtolataukselle verrataan tässä työssä mallintamalla sulkumarginaalit OL1 jakson C38 vuosihuollon R116:n ja OL2 jakson C36 vuosihuollon R216:n vaihtolatauksille. Lähtöarvoina malleille käytetään muuten samoja SIMULATElta ja datakirjastoista saatuja lähtöarvoja paitsi MKOALassa referenssik kasvutekijänä käytetään MKOALalla laskettuja kriittisyyskokeiden kasvutekijöitä toisin kuin RFSDM:llä ja QPANDALLA, joilla käytetään kriittisyyskokeiden antamaa referenssik kasvutekijää.

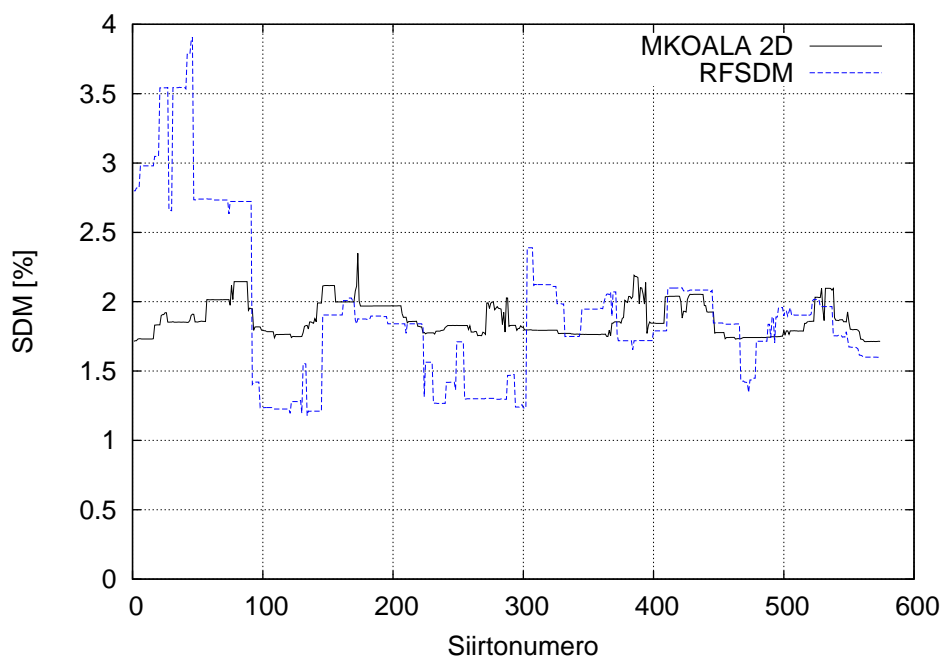
Tulokset on esitettyinä kuvissa 3 ja 4. Kuvista huomataan QPANDAn antavan pääasiassa pienimmät eli rajoittavimmat SDM arvot kun taas MKOALA antaa suurimmat.

R216 sulkumarginaaleja tarkasteltaessa huomataan MKOALAn ja RFSDM-mallin eron olevan pienempi verrattaessa R116:een. Käyrän muoto ja rajoittavimpien positioiden huomataan kuitenkin eroavan selvästi enemmän kuin mitä R116:ssa. Luonteeltaan polttoaineneenvaihdot näissä olivat hyvin erilaiset. R116 reaktorista purettiin runsaasti polttoainetta varsinaisina purkusiirtoina, jolloin reaktoriin syntyi paljon tyhjää ja sulkumarginaali kasvoi suureksi eikä QPANDALLA voitu laskea kaikkia pisteitä. R216 taas oli paljon edestakaisin latausta, jolloin reaktorista purettaessa polttoainetta sinne tuotiin myös samalla uutta polttoainetta, jolloin reaktori ei päässyt tyhjentymään niin paljoa.

Kuvissa 5 ja 6 on esitetty MKOALAn ja RFSDM-mallin antamien efektiivisten kasvutekijöiden eroa QPANDAn malliin. Kuvasta 6 huomataan, että RFSDM-malli eroaa suurimmillaan noin 600 pcm kun taas MKOALA eroaa suurimmillaan noin 1600 pcm. Myös näissä käyrissä on nähtävissä selviä yhtäläisyyksiä muodossa. Ainoastaan alussa käyrien suunta eroaa toisistaan selvästi. R116:lle samalla tavalla kuvasta 5 selvää trendiä on vaikea havaita, sillä QPANDALLA ei ole pystytty laskemaan läheskään kaikkia pisteitä. Efek-



Kuva 3: R116 suunnitellun vaihtolatauksen sulkumarginaalit siirroittain

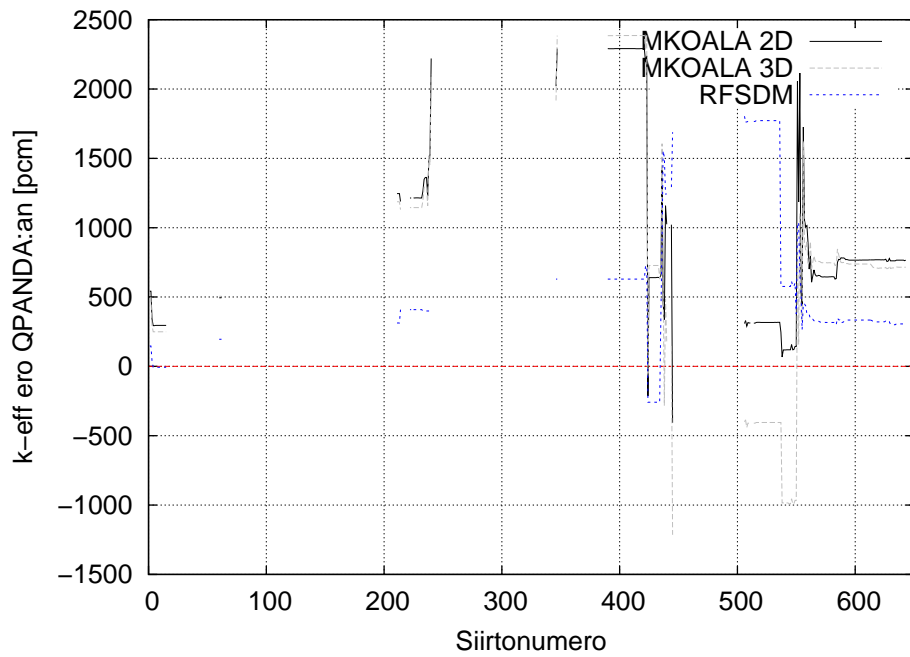


Kuva 4: R216 suunnitellun vaihtolatauksen sulkumarginaalit siirroittain

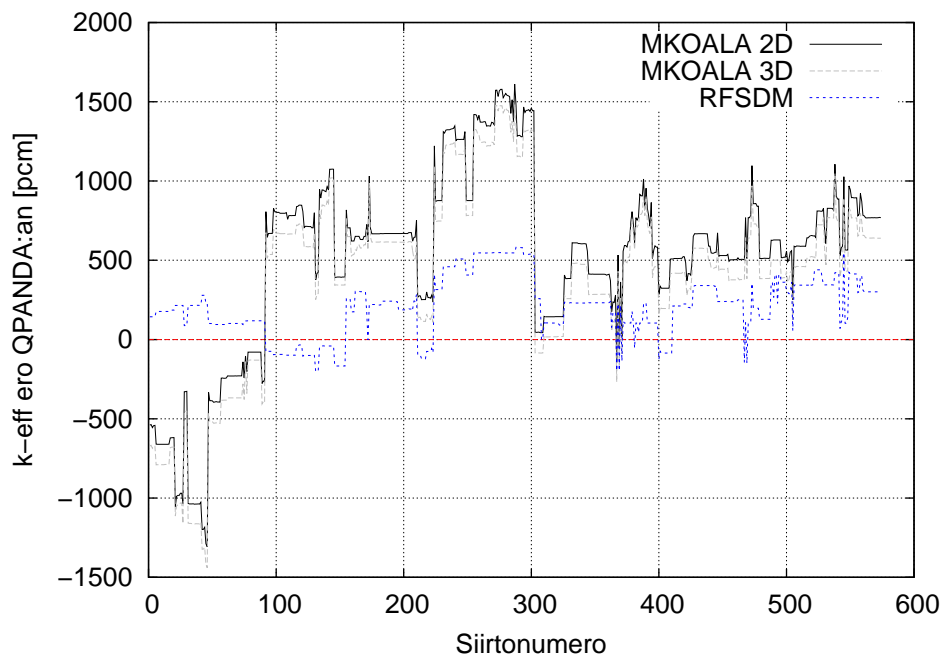
tiivisten kasvutekijöiden erot QPANDAan näyttäisivät kuitenkin kasvavan paikoin selvästi suuremmiksi. Suuret erot voivat johtua siitä, että vesireiät aiheuttavat virhettä QPANDAn laskentaan.

Kuvissa 7 ja 8 on esitetty MKOALA:n 2D- ja 3D-malleja. Tuloksia verrattaessa huomataan 3D-mallilla saatavan pääasiassa hieman pienemmät sulkumarginaalit. Siirtojen





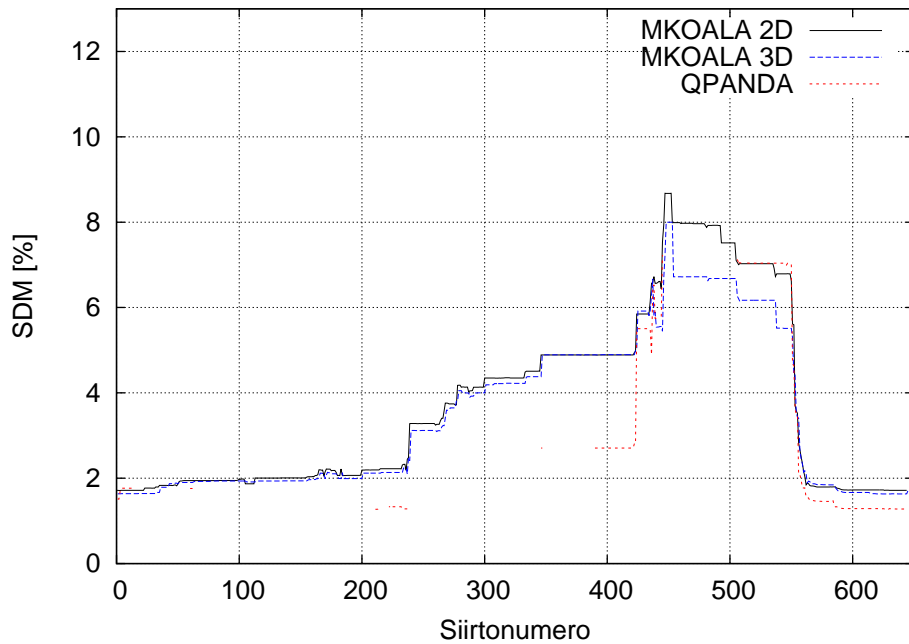
Kuva 5: R116 suunnitellun vaihtolatauksen MKOALAn ja RFSDM:n efektiivisten kasvutekijöiden ero QPANDAan



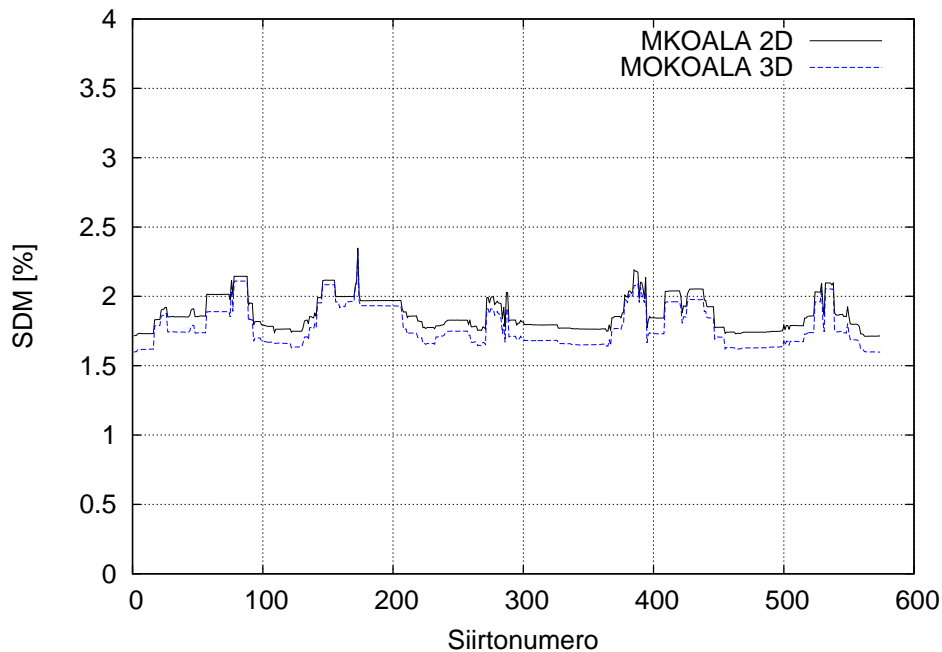
Kuva 6: R216 suunnitellun vaihtolatauksen MKOALAn ja RFSDM:n efektiivisten kasvutekijöiden ero QPANDAan

rajoittavimmat positiot eivät ole myöskään aina samat. Tasaisilla SDM alueilla rajoittava positio on yleisesti sama, mutta muutosten lähellä rajoittavissa positiossa on eroa. R216:ssa 2D- ja 3D-malli vastasivat paremmin toisiaan. 3D-malli vastaa myös hiukan

paremmin QPANDA- ja RFSDM-mallia etenkin muutosten lähellä.

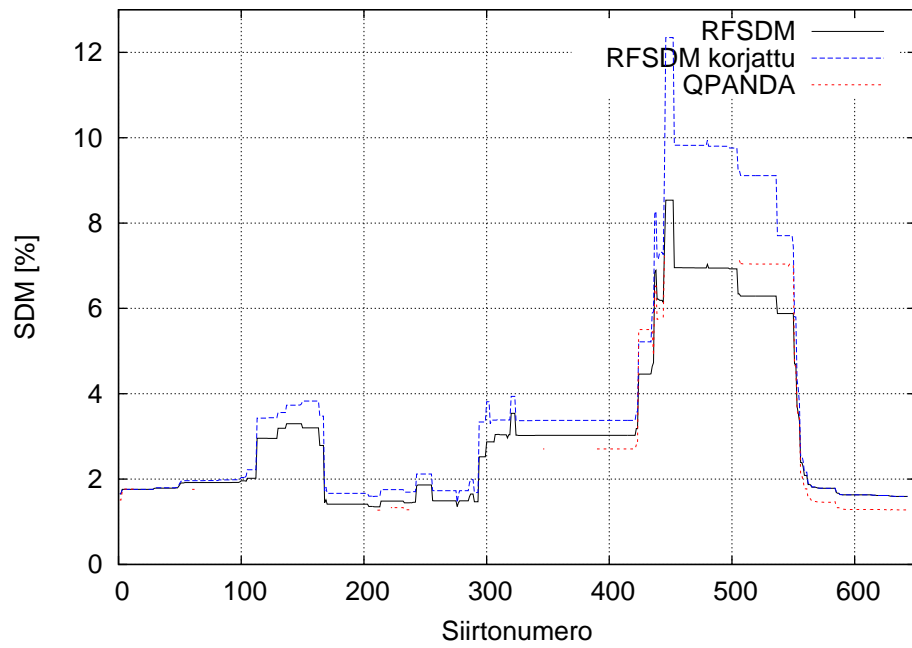


Kuva 7: R116 suunnitellun vaihtolatauksen sulkumarginaalit MKOALAlla siirroittain

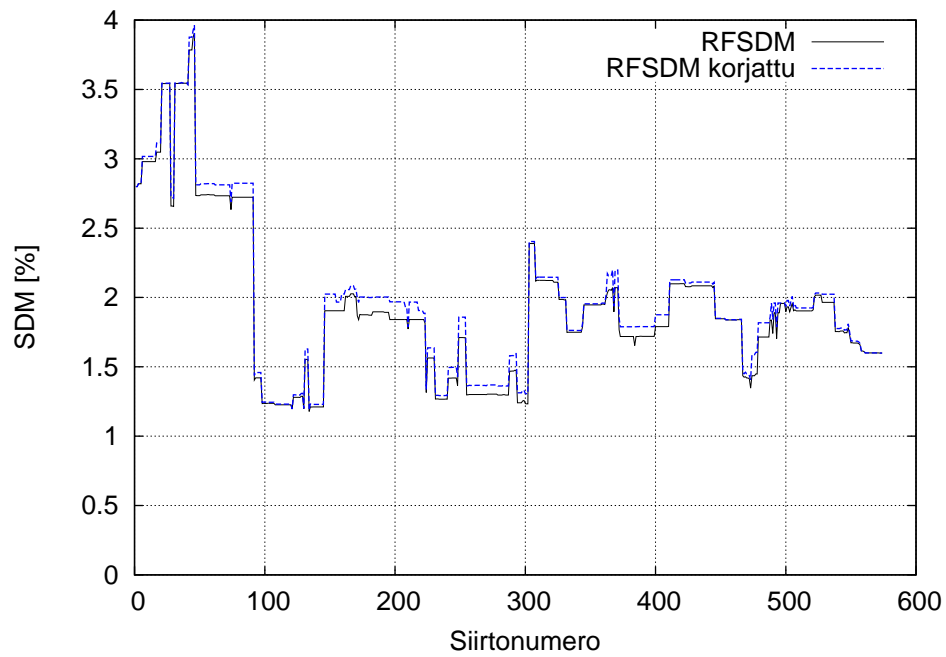


Kuva 8: R216 suunnitellun vaihtolatauksen sulkumarginaalit MKOALAlla siirroittain

RFSDM-malliin voidaan lisätä epäjatkuustekijöiden korjauskertoimet, joiden tulisi parantaa mallin tarkkuutta. Käyttämällä RFSDM-mallissa epäjatkuustekijöiden korjauskertoimia saadaan alkuperäiseen verrattuna hiukan suuremmat sulkumarginaalit. Kuvasta 9 huomataan myös, että suurilla SDM arvoilla ero näyttäisi kasvavan hyvin suureksi.



Kuva 9: R116 suunnitellun vaihtolatauksen sulkumarginaalit RFSDM:llä siirroittain



Kuva 10: R216 suunnitellun vaihtolatauksen sulkumarginaalit RFSDM:llä siirroittain

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kylmäkriittisyyskokeista saadut tulokset voidaan olettaa olevan tarkat. MKOALAlla saadut tulokset erosivat kuitenkin selvästi mittauksista saaduista tuloksista. Hajonnan perusteella ero on kuitenkin hyvin yhtenäinen. On siis mahdollista, että mallissa jokin vaikuttava tekijä on ali- tai yliedustettuna.

Olettaen, että QPANDA antaa vertailukelpoisen tarkat sulkumarginaalit, voidaan todeta RFSDM-mallin antavan tarkemmat tulokset kuin MKOALA, sillä laskuissa saadut RFSDM:n sulkumarginaalit ja kasvutekijät vastaavat paremmin QPANDA:n mallia. Myös rajoittava positio näyttäisi olevan useammin sama RFSDM:llä. RFSDM-mallin antamat rajoittavimmat tapaukset on kumminkin syytä tarkistaa QPANDAlla, sillä QPANDA antaa useinmiten rajoittavimman arvon. Laskuissa huomataan myös, että QPANDAn antama pienin sulkumarginaali ei välttämättä ole sama tilanne, minkä RFSDM antaa. Näin ollen vaikka RFSDM:n rajoittavimman arvon tapauksessa oltaisiin selvästi TTKE:n rajoissa niin raja saattaakin alittua jossain muussa tapauksessa reilustikin. Tarkistuslaskut tulisikin näin ollen suorittaa huomattavasti useammallekin kuin vain yhdelle rajoittavimmalle tilanteelle. Ongelmaksi tietenkin muodostuu taas, jos tilannetta ei voida tarkistaa vesireikien johdosta.

RFSDM:n ja QPANDAn tekemät yksinkertaistukset ongelma-kohtaisissa oletettavasti pienentävät sulkumarginaalia, jolloin nämä mallit antavat useinmiten rajoittavimmat tekijät. Konservatiivinen laskenta on ydinturvallisuuden kannalta varmempi, mutta toisaalta tarkemmalla mallinnuksella voisi välttää tarpeettomat latausmuutokset ja olisi mahdollista optimoida paremmin polttoaineenkäsittelyä. Lisäksi TTKE:n määrittely yhden prosentin raja on jo itsessään konservatiivinen, sillä reaktorin sammuttamiseen riittäisi myös 0,2 % (Laaksonen 2016b. 8).

Laskentamalleja olisi mielekkäämpää verrata menetelmiin joiden tarkkuus tiedetään paremmin. Tällainen olisi esimerkiksi Monte Carlo -menetelmää käyttävään MCNP-ohjelma. Stokastisessa Monte Carlo-menetelmässä vältetään determinististen menetelmien laskennallisista virheistä, joita syntyy oletuksista ja yksinkertaistuksista. (Lewis & Miller 1993. 296-298) Monte Carlo -menetelmällä laskenta vie kumminkin runsaasti aikaa ja tietokoneenmuistia, jotta tuloksista saadaan tarkkoja. Tästä syystä mallien vertailu tähän menetelmään on jätetty tästä työstä pois.

RFSDM-mallin ja MKOALAn 2D-mallin laskenta-ajassa ei ole merkittävää eroa. QPANDAlla R216:n laskeminen vei noin 5 tuntia ja 10 minuuttia kun taas MKOALAn 3D-mallilta laskeminen useita päiviä. MKOALAn 3D-malli ei näin ollen soveltuisi hyvin ite-

ratiiviseen sydämensuunnitteluun. Toisaalta MKOALAn 2D- ja 3D-mallin tulokset eivät eroa missään vaiheessa paljoa toisistaan ja ero mallien välillä pysyy suurimmaksi osaksi hyvin samansuuruisena, joten 2D-mallille voisi kehittää korjaustermin. Tällöin olisi perusteltua käyttää 2D-mallia suunnitteluun ja 3D-mallilla tarkistetaan vain rajoittavimmat tapaukset, mikäli voitaisiin todistaa MKOALAn mallintavan sulkumarginaalit paremmin kuin QPANDA ja RFSDM.

## 7 YHTEENVETO

Ydinreaktorien kasvutekijää ja reaktiivisuutta mitataan ja mallinetaan eri jakson vaiheissa. Kasvutekijällä mallinnetaan muun muassa sulkumarginaaleja, joiden avulla varmistetaan, että reaktori voidaan saada alikriittiseksi ja sammutettua missä tahansa tilassa. Vaatimukset sulkumarginaaleille on määritetty viranomaisen YVL:ssä ja TTKE:ssä.

TVO:n OL1 ja 2 laitoksilla sulkumarginaaleja mallinnetaan SIMULATE sydänsimulointiohjelman RFSDM- ja QPANDA-malleilla. RFSDM-malli käyttää laskennassa puolitoistaryhmäteoriaa, jolla ei päästä suureen tarkkuuteen. QPANDA-malli on taas iteratiiviseen lataussuunnitteluun hidaskäyttöinen eikä sitä ole suunniteltu kuin täyteen ladatun reaktorin mallintamiseen. Siksi siinä esiintyy epätarkkuutta, kun ilmenee suuria vesireikiä, jotka saattavat myös kaataa laskennan.

Sulkumarginaalien mallintamisen parantamiseksi TVO:lla on kehitetty uutta MKOALA sydänsimulointiohjelmia, joka perustuu QPANDAn tavoin kaksiryhmäteorian diffuusioyhtälöön. MKOALAA testattiin tässä työssä laskemalla TVO:n OL1:en ja OL2:en käyttöhistorian kylmäkriittisyyskokeiden ja 2016 vuoden vaihtolatauksien sulkumarginaalit. Tuloksia verrattiin kriittisyyskokeiden mittaus tuloksiin sekä RFSDM- ja QPANDA-mallin laskemiin tuloksiin.

Testiajojen perusteella ei voitu kumminkaan todentaa MKOALAN pääsevän parempaan tarkkuuteen kuin käytössä olevilla ohjelmilla päästään. Ohjelman käyttöönotolle tuotannossa ei ole näin ollen perusteita. Tuloksista huomattiin kuitenkin, ettei käytössä olevilla menetelmillä välttämättä havaita rajoittavinta tapausta, jolloin on riski, että alitetaan TTKE:n rajat. Näin ollen luotettavan laskentajärjestelmän kehittäminen on tärkeää.

Vertailemalla käytössä olevia laskentajärjestelmiä pelkästään toisiinsa ei voida kumminkaan varmuudella päätellä eri mallien tarkkuuksia, sillä RFSDM-mallin puolitoistaryhmän sisältämät yksinkertaistukset eivät vastaa tilannetta tarkasti. QPANDAn laskentamenetelmistä johtuvaa virheen suuruutta vaihtolatauksessa ei myöskään tarkasti tunneta. MKOALA on taas uusi laskentaohjelma, jota ei ole validoitu. Sydämensimulointimalleja tulisi näin ollen vertailla laskentamenetelmillä, joilla päästään varmasti parampaan tarkkuuteen kuten MCNP:n Monte Carlo -menetelmällä.

## LÄHDELUETTELO

- Duderstadt James J, Hamilton Louis J. 1976. Nuclear Reactor Analysis. Ensimmäinen painos. John Wiley & Sons, Inc. 650 s. ISBN 0-471-22363-8.
- Hynönen Ville. 2016. CMS-ohjelmien käyttöönoton menettelytavat. Teollisuuden Voima Oyj. Julkaisematon materiaali. Asiakirjanumero 164195. 19 s.
- Jevremonic Tatjana. 2009. Nuclear Principles in Engineering. Toinen painos. Springer. 546 s. ISBN: 978-0-387-85607-0.
- Kalliokorpi Pekka. 2013. Sulkumarginaalin määrittäminen. Teollisuuden Voima Oyj. Julkaisematon materiaali. Asiakirjanumero 103382. 14 s.
- Kaunisto Matti. 2007. SIMULATE Online -järjestelmän toiminnallinen kuvaus. Teollisuuden Voima Oyj. Julkaisematon materiaali. Asiakirjanumero 104764. 17 s.
- Laaksonen Rami. 2016a. TTKE luku 3 - Ehdot ja rajoitukset käytölle, käyttötilat 2-5. Julkaisematon materiaali. Teollisuuden Voima Oy. Asiakirja numero 100929. 66 s.
- Laaksonen Rami. 2016b. TTKE luku 8 - Perustelut käyttötiloja 1 ja 7 koskeville ehdoille ja rajoituksille. Julkaisematon materiaali. Teollisuuden Voima Oy. Asiakirja numero 100933. 66 s.
- Lamarsh John R. 1972. Introduction to Nuclear Reactor Theory. Goldstein Herbert. Toinen painos. Addison-Wesley publishing company, INC. 585 s. ISBN 66-10505.
- Lewis E.E. & Miller W.F. 1993. Computational Methods of Neutron Transport. Ensimmäinen painos. American Nuclear Society, Inc. 401 s. ISBN 0-89448-452-4.
- Nurminen Tomi H. 2011. Polttoaineen käytänsuunnitteluohje. Teollisuuden Voima Oyj. Julkaisematon materiaali. Asiakirjanumero 101896. 10 s.
- Oka Yoshiaki, Suzuki Katsuo. 2013. Nuclear Reactor Kinetics and Plant Control. Ensimmäinen painos. Tokyo: Springer JapanImprint. 305 s. ISBN 9784431541950.
- Oka Yashiaki. 2010. Nuclear Reactor Design. Ensimmäinen painos. Springer Tokyo Heidelberg New York Dordrecht London. 327 s. ISBN 978-4-431-54897-3.
- Paajanen Matti. 2016. Tekniikan tohtori; Tiimiesimies, Teollisuuden Voima Oyj. Olkiluoto. Keskustelut 6.-8.2016.
- Teollisuuden Voima Oyj. 2013. Ydinvoimalaitosyksiköt Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2. 58 s. [verkkodokumentti] [viitattu 14.6.2016] Saatavissa: <http://www.tvo.fi/Julkaisut>.

STUK, säteilyturvakeskus. 2013. YVL A.6, Ydinvoimalaitoksen käyttötoiminta. Helsinki. 14 s. ISBN 978-952-478-920-2 (pdf).

Smith Kord S. 1985. Assembly Homogenization Techniques for Light Water Reactor Analyses. Progress in Nuclear Energy, Vol 17, 1986. 303-335 s. ISSN: 0149-1970/86.

Smith Kord S. 1979. An Analytic Nodal Method for Solving the Two-Group, Multidimensional, Static and Transient Neutron Diffusion Equations. Diplomityö. Kansas State University, Department of Nuclear Engineering. 297 s.

Stacey Weston M. 2007. Nuclear Reactor Physics. Toinen painos. Wiley-VHC Verlag GmbH & co. KGaA. 706 s. ISBN 978-3-527-40679-1.



## LIITE 1. MKOALA:N MATEMAATTINEN MALLI

MKOALAn matemaattinen malli perustuu kaksiryhmäteorian diffuusiyhtälöön. Dokumentti on luotu Paajasen Matin (2016) muistiinpanojen pohjalta.

$$\Sigma_{g,t}\phi_g + \nabla \cdot \bar{\mathbf{J}}_g = \sum_{g' \neq g} \Sigma_{g' \rightarrow g} + \phi_{g'} + \lambda \chi_g \sum_{g'} \nu_{g'} \Sigma_{g',f} \phi_{g'}, \quad (7.1)$$

$$\sum_i \chi_i = 1$$

|       |                             |  |
|-------|-----------------------------|--|
| missä | $\Sigma_{g,t}$              | Ryhmän $g$ makroskooppinen kokonaisvaikutusala sisältäen fission ja sironnan |
|       | $\phi_g$                    | ryhmän $g$ neutronivuo,  |
|       | $\bar{\mathbf{J}}_g$        | ryhmän $g$ neutronivirta,  |
|       | $\Sigma_{g' \rightarrow g}$ | makroskooppinen sironna ryhmästä $g'$ ryhmään $g$ ,                          |
|       | $\lambda$                   | kriittinen ominaisarvo,  |
|       | $\chi_g$                    | neutronin todennäköisyys syntyä ryhmään $g$ ,                                |
|       | $\nu_{g'}$                  | syntyvien nopeiden fissioneutronien luku keskimäärin fissiota kohti,         |
|       | $\Sigma_{g',f}$             | ryhmän $g$ makroskooppinen fissionvaikutusala.                               |

Nyt rajoitamme ryhmien lukumäärän kahteen eli nopeisiin ja hitaisiin. Lisäksi ylöspäin-sironna voidaan poistaa ottamalla huomioon efektiivinen alaspäin-sironna lisäksi oletetaan kaikkien fissioneutronien syntyvän nopeaan ryhmään, jolloin jäljelle jää kahden yhtälön yhtälöryhmä.

$$\Sigma_{1,t}\phi_1 + \nabla \cdot \bar{\mathbf{J}}_1 = \lambda(\nu_1 \Sigma_{1,f}\phi_1 + \nu_2 \Sigma_{2,f}\phi_2) \quad (7.2)$$

$$\Sigma_{2,t}\phi_2 + \nabla \cdot \bar{\mathbf{J}}_2 = \phi_1 \Sigma_r \quad (7.3)$$

missä  $\Sigma_r$  efektiivisen alassironnan vaikutusala.

Oletetaan vielä Fickin lain pätevän

$$\bar{\mathbf{J}}_g = -D_g \nabla \phi_g \quad (7.4)$$

missä  $D_g$  diffuusiokerroin ryhmälle  $g$ .

Lisäksi merkitään  $\Sigma_r = \Sigma_{1 \rightarrow 2}$ , jolloin yhtälöryhmäksi saadaan

$$\Sigma_{1,t}\phi_1 - D_1\nabla^2\phi_1 = \lambda(\nu_1\Sigma_{1,f}\phi_1 + \nu_2\Sigma_{2,f}\phi_2) \quad (7.5)$$

$$\Sigma_{2,t}\phi_2 - D_2\nabla^2\phi_2 = \Sigma_r\phi_1 \quad (7.6)$$

missä  $\nabla^2$  Laplacen operaattori.

Sydän on jaettu noodeihin, joiden oletetaan olevan homogeenisiä. Homogeenisessä väliaineessa aineominaisuudet, kuten vaikutusalat, eivät riipu paikasta, joten tilannetta voidaan käsitellä yksiulotteisesti kussakin noodissa. Olkoon nyt siis  $\Sigma_{1,f}, \Sigma_{2,f}, \Sigma_r, \Sigma_{1,t}, \Sigma_{2,t}, D_1, D_2$  kussakin noodissa vakiot ja päteköön  $\lambda = \frac{1}{k_{\text{eff}}}$ , jolloin saadaan

$$\begin{pmatrix} \lambda\nu_1\Sigma_{1,f} - \Sigma_{1,t} & \lambda\nu_2\Sigma_{2,f} \\ \Sigma_r & -\Sigma_{2,t} \end{pmatrix} \phi = \begin{pmatrix} D_1\nabla^2 & \\ & D_2\nabla^2 \end{pmatrix} \phi \quad (7.7)$$

Karteesisessa koordinaatistossa yhteen koordinaattisuuntaan  $u$ , kehitettynä neutronivuo  $\phi$  voidaan esittää approksimaatio kahden alkeisfunktion  $\psi_1$  ja  $\psi_2$  avulla

$$\phi = \begin{pmatrix} 1 & f \\ t & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix} \quad (7.8)$$

missä  $f$  ja  $t$  vakiokertoimia.

Noodiin tulevalle vuolle kehitetään toisen asteen polynomi sovite (Smith 1979 s.34,113,182). Neliöllisen soviteen likiarvon on todettu yleisesti johtavan tarkkaan ratkaisuun. Lähtevälle vuolle kehitetään taas eksponeniaali sovite (Smith 1979 s.36).

$$\psi_1 = A_1 + Bu + Cu^2 \quad (7.9)$$

$$\psi_2 = Ee^{-\kappa(u+\frac{h}{2})} + Fe^{\kappa(u-\frac{h}{2})} + A_2 \quad (7.10)$$

missä  $A_i, B, C, D, E, F$  vakiokertoimia,

$h$  noodin pituus,

$\kappa = \frac{\Sigma_{2,t}}{D_2}$  toteuttaen approksimatiivisesti homogeenisen  $\phi_2$  :n yhtälön.

Jos olisi  $\phi_1 = \psi_1$  eli toisin sanoen  $f = 0$ , niin pätsi

$$\phi_1 \left( +\frac{h}{2} \right) = \bar{\phi}_1 - \frac{h}{6D_1} \left( 2J_1 \left( +\frac{h}{2} \right) + J_1 \left( -\frac{h}{2} \right) \right) \quad (7.11)$$

$$\phi_1\left(-\frac{h}{2}\right) = \bar{\phi}_1 + \frac{h}{6D_1} \left( 2J_1\left(-\frac{h}{2}\right) + J_1\left(+\frac{h}{2}\right) \right) \quad (7.12)$$

$$\bar{\phi} = \frac{\int_{+h/2}^{-h/2} \phi dx}{h}$$

Vastaavasti, jos  $\phi_2 = \psi_2$  eli  $t = 0$

$$\phi_2\left(+\frac{h}{2}\right) = \bar{\phi}_2 - \frac{1}{\kappa D_2} J_2\left(+\frac{h}{2}\right) \quad (7.13)$$

Yhtälöstä on jätetty  $e^{-\kappa h}$  pois, sillä  $\kappa = \sqrt{\frac{\Sigma_{2,t}}{D_2}}$  ja tyypillisesti  $\Sigma_{2,t} \approx 0,05 - 0,1 \frac{1}{cm}$  sekä  $D_2 \approx 0,3cm$  jolloin

$$\Rightarrow \kappa \approx 0,5 \frac{1}{cm} \quad \text{ja} \quad h \approx 15cm \quad (7.14)$$

$$\Rightarrow \kappa h \approx 7 \sim 10 \quad (7.15)$$

$$\Rightarrow e^{-7} \ll 1 \quad (7.16)$$

Toisaalta kaikille noodeille pätee säilymlaki kunkin noodin vakioilla  $\Sigma_x, D_x$ . Kun noodi on suorakulmainen särmiö  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ , saadaan yhtälöksi

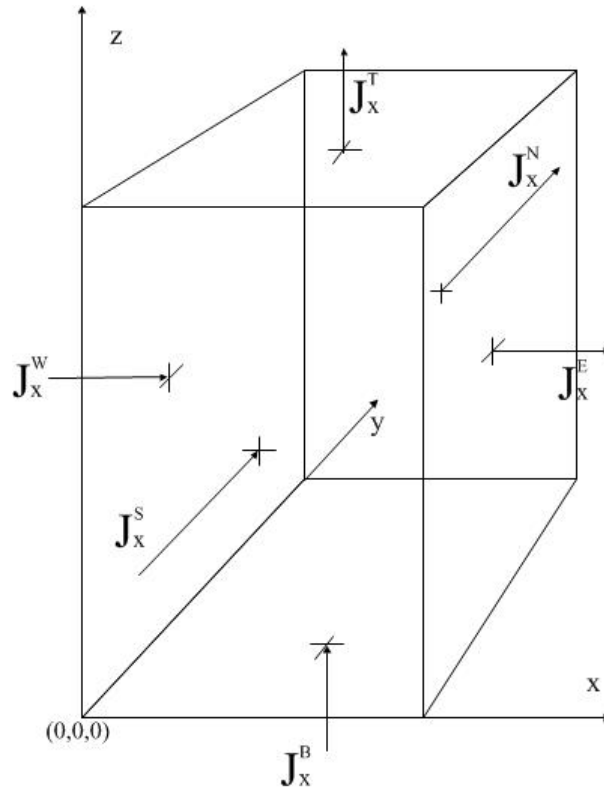
$$\begin{pmatrix} \lambda \Sigma_{1,f} - \Sigma_{1,t} & \lambda \Sigma_{2,f} \\ \Sigma_r & -\Sigma_{2,t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\phi}_1 \\ \bar{\phi}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{J_1^E - J_1^W}{\Delta x} + \frac{J_1^N - J_1^S}{\Delta y} + \frac{J_1^T - J_1^B}{\Delta z} \\ \frac{J_2^E - J_2^W}{\Delta x} + \frac{J_2^N - J_2^S}{\Delta y} + \frac{J_2^T - J_2^B}{\Delta z} \end{pmatrix} \quad (7.17)$$

Merkitään  $\psi_1, \psi_2$ :n virrat  $j_1$  ja  $j_2$  omissa ryhmissä eli toisin sanoen  $j_1 = -D_1\psi_1$  ja  $j_2 = -D_2\psi_2$ . Toisaalta

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} D_1 \nabla \phi_1 \\ D_2 \nabla \phi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -D_1 \nabla & 0 \\ 0 & -D_2 \nabla \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f \\ t & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -D_1 \nabla & -D_1 f \nabla \\ -D_2 t \nabla & -D_2 \nabla \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & f \frac{D_1}{D_2} \\ t \frac{D_2}{D_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -D_1 \psi_1 \\ -D_2 \psi_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (7.18)$$

jolloin

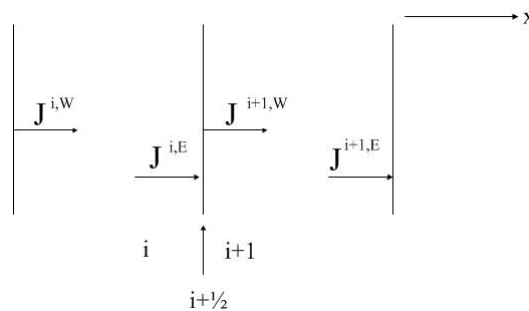
$$\begin{pmatrix} -D_1 \psi_1 \\ -D_2 \psi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} j_1 \\ j_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{1 - tf} \begin{pmatrix} 1 & f \frac{D_1}{D_2} \\ t \frac{D_2}{D_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \end{pmatrix} \quad (7.19)$$



Kuva 11: Laskentanoodi

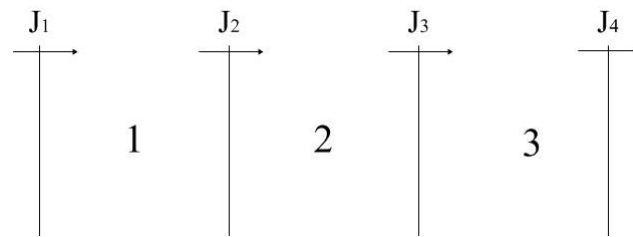
Tämä on hyödyllistä, sillä tiedämme nyt miten  $j_1, j_2$  -muotoiset virrat antavat noodi-koppien seinävuot. Toisaalta globaaliin ratkaisuun tarvitsemme yhtälön 7.17 mukaan  $J_x t$  seinillä

Fysikaalisesti on mielekästä, ettei naapurikoppien välillä neutroneita katoa tai synny. Toisin sanoen kuvan 12 mukaan 1-D:ssä seinällä  $i + 1/2$  tulee päteä  $J^{1,E} = J^{i+1,W}$  kummallekin n-ryhmälle.



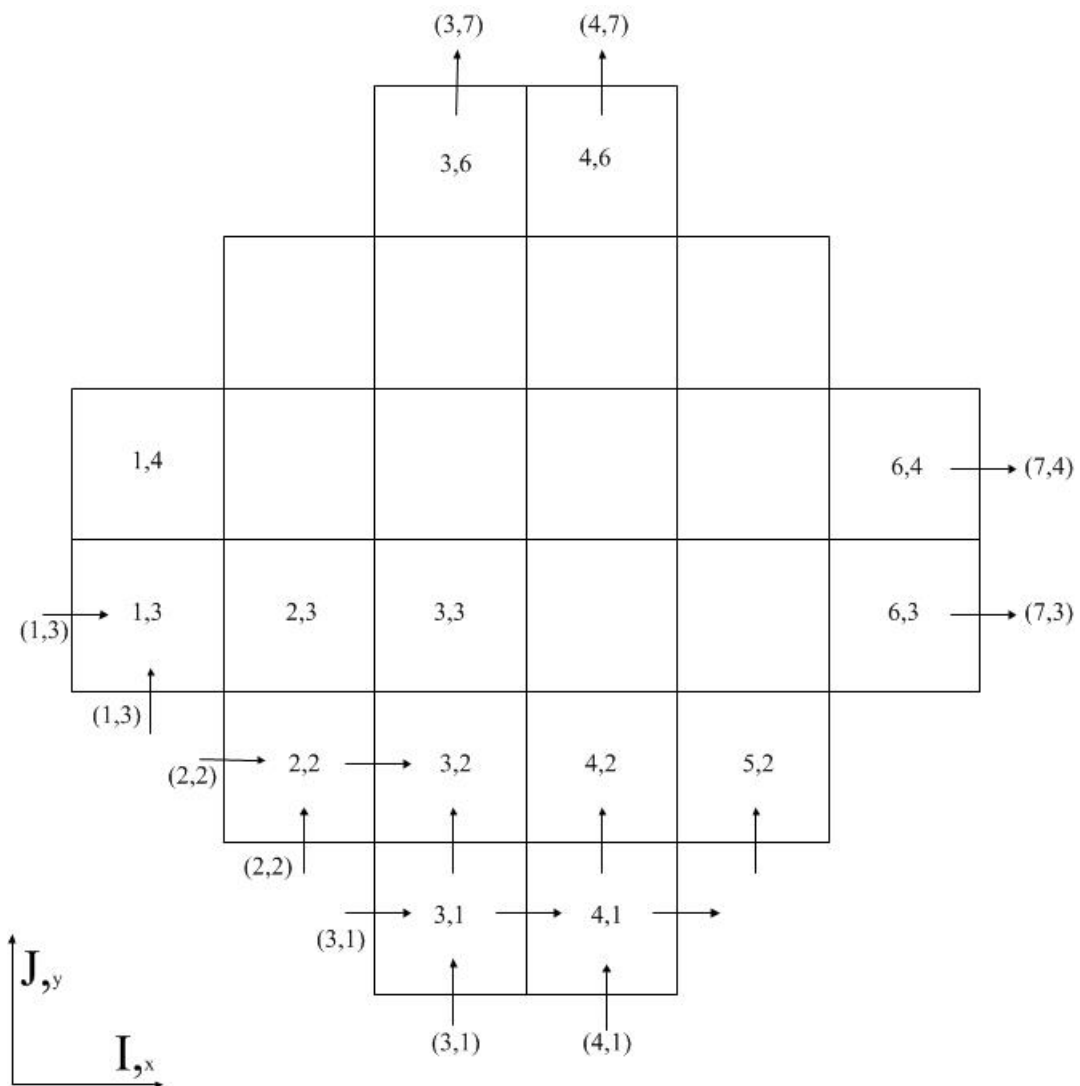
Kuva 12: Neutronivirta 1D:ssä

Kolmen noodin tilanteessa 1D:ssä tulisi näin ollen neljä reunan neutronivirtaa kuvan 13 mukaan



Kuva 13: Neutronivirta 1D:ssä kolmelle noodille

Kaksiulotteisessa tapauksessa vastaavasti virtoja muodostuu kahteen suuntaan kuvan 14 tavalla



Kuva 14: Neutronivirrat kaksiulotteisessa minireaktorissa

Näin saadaan ratkaistua neutronivirrat noodien välillä. Virrat ulkoreunoilla saadaan määritettyä niin, että oletetaan virtojen aiheuttavan reunoilla  $\phi = 0$ . Toinen ehto on, että ulos menevä virta ei pala. Tämä saadaan ratkaistua osittaisvirtojen avulla reunalla, missä po-

sitiivinen virta on ulos yleisen sovituksen mukaan on

$$j^{\text{ulos}} = \frac{1}{2}J + \frac{1}{4}\phi j^{\text{sis}} = -\frac{1}{2}J + \frac{1}{4}\phi \quad (7.20)$$

missä  $J$  ja  $\phi$  ovat reuna-arvoja. Vaaditaan siis, että  $j^{\text{sis}} = 0 \rightarrow j^{\text{reuna}} = \frac{1}{2}\phi^{\text{reuna}}$ . Voidaan myös olettaa, että tietty osuus  $a$  heijastuu takaisin

$$j^{\text{sis}} = aj^{\text{ulos}} \rightarrow (a+1)j^{\text{reuna}} = \frac{1-a}{2}\phi^{\text{reuna}} \quad (7.21)$$

Ratkaistaan nyt esimerkiksi neutronivuo E-sivulla

$$\begin{aligned} \phi_1^E &= \bar{\phi}_1 - \frac{\Delta x}{6D_1}(2j_1^E + j_1^W) - \frac{1}{\kappa D_2}j_2^W f \\ &= \bar{\phi}_1 + \frac{1}{1-tf} \left[ -\frac{\Delta x}{6D_1} \left\{ 2 \left( \bar{J}_1^E - f \frac{D_1}{D_2} \bar{J}_2^E \right) + \bar{J}_1^W - f \frac{D_1}{D_2} \bar{J}_2^W \right\} - \right. \\ &\quad \left. \frac{f}{\kappa D_2} \left( \bar{J}_2^E - t \frac{D_1}{D_2} \bar{J}_1^E \right) \right] \end{aligned} \quad (7.22)$$

Muut sivut saadaan ratkaistua analogisesti. Toisaalta totesimme yleistä  $\bar{\phi}_x$ :stä, joten merkitään

$$\bar{\phi}_1 = s_1 + \frac{\bar{J}_1^W - \bar{J}_1^E}{\Delta x} \quad (7.23)$$

missä  $s$  toisten koordinaattisuuntien aiheuttama sisään/ulosvuoto sekä edellisen kierroksen lähde, jolloin

$$\phi_1^E = s_1 + \left( \frac{1}{\Delta x} - \frac{\Delta x}{6D_1(1-tf)} \frac{\Delta x \cdot f}{6D_2(1-tf)} \frac{tf}{\kappa D_1(1-tf)} - \frac{\Delta x}{3D_1(1-tf)} - \frac{1}{\Delta x} \frac{f}{6D_2(1-tf)} \left( \frac{\Delta x}{6} - \frac{1}{\kappa} \right) \right) \begin{pmatrix} J_1^W \\ J_2^W \\ J_1^E \\ J_2^E \end{pmatrix} \quad (7.24)$$

Vastaava lauseke saadaan  $\phi_2^E$ , joskin eri kertoimilla. Toisaalta Kord Smith antaa ymmärtää, että  $\phi_1^E = \phi_{i+1}^W$  ei ole riittävä, vaan on huomioitava kokoonpanon epäjatkuvuustekijä siten, että

$$\begin{cases} f_1^E(i)\phi_1^E(i) = f_1^W(i+1)\phi_1^W(i+1) \\ f_2^E(i)\phi_2^E(i) = f_2^W(i+1)\phi_2^W(i+1) \end{cases} \quad (7.25)$$

missä  $f$  epäjatkuuustekijät.

Nyt rajapinnan  $i + 1/2$  kohdalla saadaan

$$\begin{pmatrix} x & x & x & x & x & x \\ x & x & x & x & x & x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j_1^{i-1} \\ j_2^{i-1} \\ j_1^i \\ j_2^i \\ j_1^{i+1} \\ j_2^{i+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} as_1^{1-1/2} + bs_1^{1+1/2} \\ cs_2^{1-1/2} + ds_2^{1+1/2} \end{pmatrix} \quad (7.26)$$

missä kertoimet  $x$  sekä  $a - d$  saadaan päättelemällä yltä. Näin saamme (2x2) blokeista tridiagonaali yhtälön. Esimerkiksi 5:n rajapinnan eli neljälle noodille saadaan

$$\begin{pmatrix} \begin{pmatrix} x & x \\ x & x \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} x & x \\ x & x \end{pmatrix} & & & & & \\ & \begin{pmatrix} x & x \\ x & x \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} x & x \\ x & x \end{pmatrix} & & & & \\ & & \begin{pmatrix} x & x \\ x & x \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} x & x \\ x & x \end{pmatrix} & & & \\ & & & \begin{pmatrix} x & x \\ x & x \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} x & x \\ x & x \end{pmatrix} & & \\ & & & & \begin{pmatrix} x & x \\ x & x \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} x & x \\ x & x \end{pmatrix} & \\ & & & & & \begin{pmatrix} x & x \\ x & x \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} x & x \\ x & x \end{pmatrix} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_1 \\ J_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s \end{pmatrix} \quad (7.27)$$

Oikeassa kolmiulotteisessa reaktorissa samat yhtälöt tulee ratkoa kolmessa suunnassa kulkekin kahden koordinaattisuunnan indeksiparille. Toisin sanoen olkoon  $I = 1, 2, 3$ ,  $J = 1, 2$  ja  $K = 1, 2, 3, 4$ , jolloin saadaan  $i/x$  suuntaan  $2 \times 4$  matriisiyhtälöä, joissa kussakin korkeintaan neljä (3+1) virtaa kerrottuna kahdella ryhmällä.  $j/y$  suuntaan  $3 \times 4$  yhtälöä ja 3 alkiota,  $k/z$  suuntaan  $3 \times 2$  yhtälöä ja 5 alkiota. Todellisessa TVO:n reaktorissa on 26 noodia tai 28, kun otetaan huomioon eksplisiittiset heijastimet I ja J suuntaan ja 25 (27) noodia K suuntaan.

Paikalliset kriittisyydet voidaan ratkaista iteratiivisesti asettamalla alkuarvaukseksi  $k_{\text{eff}} = 1$  ja kaikkialla

$$s = (\nu_1 \Sigma_{1,f}) \phi_1 + (\nu_2 \Sigma_{2,f}) \phi_2 \equiv 1 \quad (7.28)$$

Tämän jälkeen ratkaistaan noodirajojen virrat. Virtojen avulla kussakin noodissa pätee tasapaino, eli toisin sanoen

$$\frac{1}{k_{\text{eff}}}(\nu_1 \Sigma_{1,f} \phi_1 + \nu_2 \Sigma_{2,f} \phi_2) - (\Sigma_a + \Sigma_r) \phi_1 = L_{1,\text{out}} \quad (7.29)$$

$$\Sigma_r \phi_1 - \Sigma_{2,a} \phi_2 = L_{2,\text{out}} \quad (7.30)$$

missä  $L_{\text{out}}$  on noodin seinien yli yhteenlaskettu nettovirta ulos, eli toisin sanoen

$$L_{\text{out}} = \frac{J_1^{\text{E}} - \bar{J}_1^{\text{W}}}{\Delta x} + \frac{\bar{J}_1^{\text{N}} - \bar{J}_1^{\text{S}}}{\Delta y} + \frac{\bar{J}_1^{\text{T}} - \bar{J}_1^{\text{B}}}{\Delta z} \quad (7.31)$$

Nyt voidaan ratkaista  $\phi_1$  ja  $\phi_2$  kussakin noodissa.

Uusi estimaatti  $k_{\text{eff}}$ :lle saadaan määritelmästä

$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{syntynopeus}}{\text{absorptionopeus} + \text{vuoto}} \quad (7.32)$$

Jos kaikki laskenta-alueen noodit ovat indeksit  $i$  ja vuodot ulos ovat noodiseiniltä  $b$

$$k_{\text{eff}} = \frac{\sum_i [(\nu_{1,i} \Sigma_{1,f,i}) \phi_{1,i} + (\nu_{2,i} \Sigma_{2,f,i}) \phi_{2,i}]}{\sum_i [\Sigma_{1,a,i} \phi_{1,i} + \Sigma_{2,a,i} \phi_{2,i}] + \sum_b (J_{1,\text{out}} + J_{2,\text{out}})} \quad (7.33)$$

Lasketaan uusi  $s$  kaikissa noodeissa määritelmästä 7.28 ja normitetaan siten, että  $\bar{s} = 1$ . Tällä vältetään numeeriset yli- tai alivuodot.

Tämän jälkeen verrataan  $\Delta k_{\text{eff}}$  ja  $\Delta s$  edelliseen arvoon ja jos toleranssi on  $\Delta k_{\text{eff}} < 10^{-7}$  ja  $RMS(\Delta s) < 10^{-3}$  sisällä lopetetaan, muutoin palataan takaisin ratkaisemaan uudestaan noodirajojen virrat.