
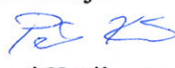
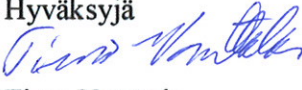


Kriittisyysturvallisuuden parametritarkastelu

Kirjoittajat: Tuomas Viitanen, Karin Rantamäki ja Silja Häkkinen

Luottamuksellisuus: julkinen

Raportin nimi Kriittisyysturvallisuuden parametritarkastelu		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Valtion ydinjätehuoltorahasto	Asiakkaan viite 9/2011SAF	
Projektin nimi CRISTAL/SAFIR 2014	Projektin numero/lyhytnimi 73652	
Raportin laatija(t) Tuomas Viitanen, Karin Rantamäki ja Silja Häkkinen	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 34/5	
Avainsanat Kriittisyysturvallisuus, VVER, MCNP, Serpent	Raportin numero VTT-R-00786-12	
Tiivistelmä <p>Kriittisyysturvallisuus kattaa polttoainekierron kaikki vaiheet reaktoria lukuun ottamatta. Sillä tarkoitetaan sitä, että kaikissa olosuhteissa varmistutaan polttoaineen alikriittisyydestä riittäväällä turvamarginaalilla. Suomessa kohteena ovat käytännössä erilaiset varastoaltaat, kuljetusjärjestelmät ja loppusijoitus.</p> <p>Alikriittisyys varmistetaan tyypillisesti esim. Monte Carlo-ohjelmilla. Laskennassa tarpeelliset yksinkertaistukset eivät missään tapauksessa saa vaarantaa systeemin alikriittisyyttä, vaan malli pitää rakentaa konservatiivisesti. Analyysin tekijän tulisi osata ottaa nämä asiat huomioon.</p> <p>Tällä työllä on pyritty helpottamaan konservatiivisten approksimaatioiden tekemistä. Työssä on käyty läpi VVER-440 –tyyppisen polttoainepin kaikki parametrit. Niitä varioitiin yksi kerrallaan kirjallisuuden avulla päätellyn vaihteluvälin puitteissa. Työn tarkoituksena on tarjota käsitys polttoainepin parametrien vaikutuksesta reaktiivisuuteen. Tuloksina on esitetty parametrin vaikutus reaktiivisuuteen. Myös sen koosta ja merkittävydestä on pyritty antamaan arvio.</p>		
Luottamuksellisuus	julkinen	
Espoo 3.2.2012 Laatija  Tuomas Viitanen tutkija	Tarkastaja  Petri Kotiluoto johtava tutkija	Hyväksyjä  Timo Vanttola teknologiapäällikkö
VTT:n yhteystiedot Teknologian tutkimuskeskus VTT, PL 1000, 02044 VTT		
Jakelu (asiakkaat ja VTT) SAFIR2014/TR3, TK5011		
<p style="text-align: center;"><i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i></p>		

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	3
2	Menetelmät.....	4
3	Parametrien vaikutus reaktiivisuuteen	6
3.1	Pelletin keskireiän säde	6
3.2	Pelletin säde	6
3.3	Kaasuaukon leveys.....	8
3.4	Suojakuoren paksuus	9
3.5	Virtauskanavan kotelon sisäsäde.....	9
3.6	Virtauskanavan kotelon paksuus	11
3.7	Keskusputken sisäsäde ja paksuus	11
3.8	Sauvojen siirtyminen	13
3.9	Polttoainesauvojen hilaväli.....	14
3.10	Polttoaineniippujen hilaväli.....	16
3.11	Polttoaineen väkevöintiaste	17
3.12	^{234}U osuus ^{235}U :sta	18
3.13	Polttoaineen tiheys.....	19
3.14	Suojakuoren tiheys	20
3.15	Jäähdytteen tiheys	21
3.16	Vedenpinnan korkeus	22
3.17	Virtauskanavan kotelon tiheys	23
3.18	Suojakuoren ja virtauskanavan kotelon Hf-pitoisuudet	24
3.19	Suojakuoren ja virtauskanavan kotelon Nb-pitoisuudet	24
4	Yhteenveto	26
	Viitteet.....	29
Liitteet		
A	Nominaalitapausten syöttötiedostot.....	30
A.1.	MCNP:n syöttötiedosto	30
A.2.	Serpentin syöttötiedosto.....	32

1 Johdanto

Kriittisyysturvallisuus kattaa polttoainekierron kaikki vaiheet reaktoria lukuun ottamatta. Reaktori muodostaa poikkeuksen, koska se on suunniteltu olemaan kriittinen tai tehonoston aikana jopa jossain määrin ylikriittinen. Kaikissa muissa kierron vaiheissa polttoaineen on oltava alikriittinen. Kriittisyysturvallisuudella tarkoitetaan sitä, että kaikissa olosuhteissa varmistutaan polttoaineen alikriittisyydestä riittävällä turvamarginaalilla. Tämä koskee myös kaikkia käsittely-, varastointi- ja kuljetusjärjestelmiä. Suomessa ei ole polttoainetehtaita tai jälleenkäsittelylaitoksia, joten täällä kohteena ovat pääasiassa erilaiset varastointialtaat, kuljetussäiliöt sekä loppusijoitus.

Systeemin alikriittisyys varmistetaan laskennallisesti mallintamalla kohde tyypillisesti esim. Monte Carlo-ohjelmalla. Mallinnuksessa joudutaan aina tekemään joitakin yleistyksiä ja yksinkertaistuksia. Nämä yleistyksiset tai yksinkertaistukset eivät kuitenkaan saa missään tapauksessa aiheuttaa tilannetta, joissa ne vähentäisivät kohteen laskettua reaktiivisuutta. Ennemminkin malli pitää rakentaa konservatiivisesti eli niin että kohteen laskettu reaktiivisuus on suurempi kuin sen todellinen arvo. Tästä syystä kriittisyysturvallisuusanalyysin tekijän tulisi olla mahdollisimman kokenut. Kokemuksen kartuttaminen on kuitenkin pitkäaikainen prosessi.

Kokemus tuo mukanaan arvokasta tietoa siitä, minkälaiset valinnat mallinnuksessa ovat konservatiivisia. Tällä työllä on pyritty helpottamaan tätä kokemuksen karttumista ja valintojen tekemistä erityisesti vähemmän kokemusta omaaville mallintajille. Työssä on pyritty käymään läpi yhden polttoainepun osalta kaikki parametrit. Parametreja on varioitu yksi kerrallaan ns. nominaaliarvon ympärillä. Työn tarkoituksena on tarjota mallintajalle, ja muille kriittisyysturvallisuuden kanssa tekemisissä oleville, käsitys polttoainepun parametrien vaikutuksesta reaktiivisuuteen. Paitsi parametrin vaikutuksen suunnasta myös sen koosta ja merkittävydestä on pyritty antamaan arvio. Tässä työssä on pitäyditty pelkästään VVER-440 tyyppisessä polttoaineessa ja sen parametreissa, mutta kokemuksen kartuttamiseksi voisi olla hyödyllistä tarkastella myös BWR-tyyppisiä polttoainepippuja.

Tähän raporttiin on koottu työn tulokset. Raportin on tarkoitus toimia eräänlaisen käsikirjan tapaan, josta voi tarkastella parametrien vaikutusta reaktiivisuuteen. Työssä käytetty malli ja menetelmät on kuvattu luvussa 2. Tulokset parametritarkasteluista on koottu lukuun 3 parametri kerrallaan. Lopuksi luvussa 4 annetaan lyhyehkö yhteenvedo työstä.

2 Menetelmät

Parametrien vaikutusta systeemin reaktiivisuuteen tutkittiin tekemällä kolme simulointisarjaa. Sarjoista kaksi laskettiin MCNP-ohjelmalla [1] käyttäen ENDF/B-VII sekä JEFF-3.1.1 -pohjaisia vaikutusalakirjastoja, ja kolmanteen sarjaan käytettiin Serpent-ohjelmaa [2] JEFF-3.1.1 -pohjaisella vaikutusalakirjastolla. Kirjastoista ENDF/B-VII on MCNP:n standardikirjasto, kun taas JEFF-3.1.1 -kirjasto on Serpentin jakelupaketista. Kolmen simulointisarjan lisäksi tehtiin muutama erillinen lasku vain toisella ohjelmista.

MCNP [1] on Los Alamos National Laboratory:ssa, USA:ssa kehitetty yleiskäyttöinen Monte Carlo -menetelmään perustuva hiukkastenkuljetusohjelma. Reaktorifysiikkasovelluksissa ohjelmaa käytetään useimmiten neutronien kulkeutumislaskuihin, mutta ohjelma kykenee laskemaan myös fotonien ja elektronien kulkeutumista. Reaktorisovelluksissa tämä mahdollistaa mm. gammasäteilyn tuottaman tehojakauman tarkan ratkaisemisen. MCNP on hyvin laajalti validoitu ja käytetty, minkä vuoksi sitä voidaan pitää erittäin luotettavana koodina kriittisyysturvallisuustarkasteluihin.

Serpent [2] on VTT:llä kehitetty Monte Carlo -menetelmään perustuva reaktorifysiikka ja palamalaskentaohjelma. Sen fysiikkamalli on hyvin samanlainen MCNP:ssä käytetyn fysiikkamallin kanssa. Ohjelma kuitenkin hyödyntää optimointitekniikoita (Woodcock delta tracking -kuljetustekniikka, yhdistetty vaikutusalojen energiapistejako jne.), joiden ansiosta Serpent on käytännön reaktorifysiikkalaskuissa huomattavasti MCNP:tä nopeampi.

Parametritarkastelu tehtiin VVER-440 -tyyppiselle nipulle. Simuloinneissa käytetyt parametrit on esitetty taulukossa 1 [3–6]. Niput sijoitettiin äärettömään hilaan xy -suunnassa käyttäen heijastavia reunaehtoja. Nipun ylä- ja alaosan tukirakenteet mallinnettiin vetenä. Tämän lisäksi nipun ylä- ja alapuolelle (z -suunta) lisättiin 20 cm vesikerros. Kuvassa 1 on ohjelmien geometriapiirtureilla laaditut kuvat systeemin geometriasta. Nippujen hilaväli vastaa tyypillistä varstogeometriaa. Täytyy kuitenkin huomata, että todellisissa varastoissa nippujen välissä voi olla neutroneita absorboivaa materiaalia (esim. booriteräs), joten tässä lasketut tulokset eivät sellaisenaan päde millekään oikealle polttoainearastolle.

MCNP-laskujen lämpötilaksi valittiin TMP-kortilla 294 K, koska ENDF/B-VII kirjasto on määritetty tälle lämpötilalle. MCNP-laskujen lämpötilaa ei muutettu 300 K lämpötilan JEFF-3.1.1 -kirjastolla tehtyjä laskuja varten, joten tämän kirjaston laskut olivat osittain 294 K (elastisen sironnan vapaakaasumalli, termisen alueen sirontavaikutusalat¹) ja osittain 300 K lämpötilassa (resonanssialueen vaikutusalat ja erottamattomien resonanssien alueen todennäköisyystaulukot). Serpent-laskut tehtiin kaikilta osin 300 K lämpötilassa.

Simulointisarjan varioitaviksi parametreiksi valittiin mahdollisimman monta VVER-nipun parametria laidasta laitaan. Parametreja valittaessa pyrittiin ennen kaikkea systemaattisuuteen, ja mahdolliset ennakkokäsitykset parametrien reaktiivisuusvaikutuksesta jätettiin tässä vaiheessa huomiotta. Varioinneissa lähdettiin aina liikkeelle nominaalitapauksesta, ja parametreja varioitiin yksitellen. Parametrien vaihteluväleiksi valittiin valistuneet arvaukset realistisista maksimipoikkeamista. Simulointisarjoissa varioidut parametrit sekä vastaavat tulokset on esitelty luvussa 3.

¹Jos termisen sironnan vaikutusala on eri lämpötilassa kuin TMP-kortilla annettu lämpötila, korjaa MCNP sirontavaikutusalan lämpötilan menetelmällä, joka on osittain selostettu viitteessä [1, sivut 2-29].

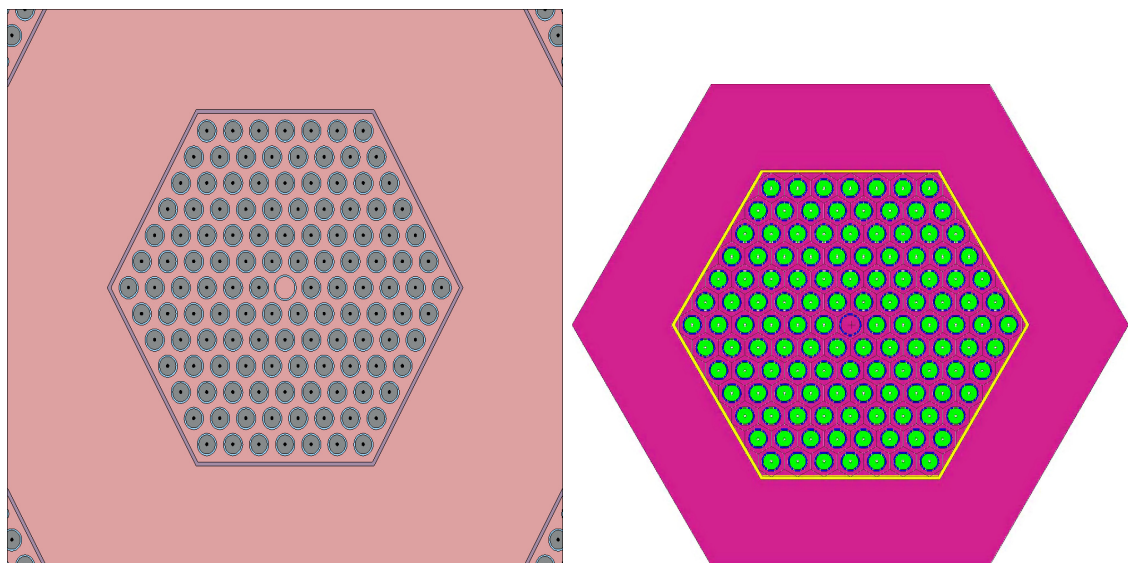
Taulukko 1. Työssä käytetyn VVER-nipun parametrien arvot nominaalitapaukselle sekä käytetyt vaihteluvälit [3–6].

Parametri	Yksikkö	Nominaali	Min	Max
Väkevöintiaste	[w-%] ^a	4.0	3.0	5.0
²³⁴ U:n osuus ²³⁵ U:sta	[w-%]	0.85	0	1.0
Polttoaineen tiheys	[g/cm ³]	10.4	10.3	10.8
Suojakuoren tiheys	[g/cm ³]	6.55	6.50	6.60
Virtauskanavan kotelon tiheys	[g/cm ³]	6.57	6.52	6.62
Pelletin keskiaukon säde	[mm]	0.75	0.70	0.80
Pelletin ulkosäde	[mm]	3.80	3.775	3.825
Kaasuaukon leveys	[mm]	0.075	0	0.13
Suojakuoren paksuus	[mm]	0.65	0.60	0.70
Keskusputken sisäsäde	[mm]	4.5	4.4	4.6
Keskusputken seinämän paksuus	[mm]	0.65	0.60	0.70
Virtauskanavan “sisäsäde”	[cm]	7.06	7.01	7.10
Virtauskanavan seinämän paksuus	[cm]	0.15	0.10	0.21
Sauvojen hilaväli	[cm]	1.22	1.03	1.223
Nippujen hilaväli	[cm]	22.5	14.4	25
Lämpötila	[K]	294(MCNP) tai 300(Serpent)		
Jäähdytteen tiheys	[g/cm ³]	0.9591	0	1.0

^aTässä raportissa käytetään merkintää w-% osoittamaan paino-% ja merkintää a-% atomi-%:lle.

Taulukko 2. Suojakuoren ja virtauskanavan kotelon koostumukset [w-%].

Alkuaine	Suojakuori	Kotelo
Zr	98.99	97.49
Nb	1.0	2.5
Hf	0.01	0.01



Kuva 1. Varastogeometriassa VVER-nippua ympäröi suuri vesimäärä. Vasemmalla on Serpentin tuottama kuva ja oikealla MCNP:n.

3 Parametrien vaikutus reaktiivisuuteen

Tässä luvussa kerrotaan taustaa simulointisarjassa varioiduista parametreista ja esitetään simulointien tulokset. Kunkin parametrin osalta tehdään myös johtopäätöksiä parametrin tärkeydestä ja epävarmuuksien merkityksestä kriittisyysturvallisuustarkasteluissa.

Tuloksena annetaan kasvutekijä k_{eff} sekä tilastollinen keskihajonta σ . Jos kasvutekijä k_{eff} oletetaan normaalijakautuneeksi, on laskettu arvo 68 % todennäköisyydellä välillä $k_{\text{eff}} \pm \sigma$, 95 % todennäköisyydellä välillä $k_{\text{eff}} \pm 2\sigma$ jne. [7]. Taulukoissa annetaan myös kasvutekijän ero nominaalitapaukseen verrattuna $\Delta k_{\text{eff}} = 10^5 \times (k_{\text{eff}}^i - k_{\text{eff}}^0)$, missä k_{eff}^i on ns. variaatio-laskun tulos ja k_{eff}^0 on nominaalitapauksen tulos. Yksikkönä käytetään tällöin pcm.

3.1 Pelletin keskireiän säde

Useissa VVER-polttoainetyypeissä polttoaineen keskellä on kaasutäytteinen reikä. Tämän reiän koon vaikutusta tutkittiin tällä kertaa kahdella eri tavalla. MCNP-laskuissa muutettiin pelkkää sädettä, jolloin aukon kasvun myötä polttoaineen kokonaismäärä systeemissä vähenee. Serpent-laskuissa puolestaan muutettiin aukon säteen lisäksi polttoaineen tiheyttä siten, että polttoaineen kokonaismäärä systeemissä säilyi vakiona. Aukon säteen vaihteluväli 0.07-0.08 cm valittiin kuvaamaan maksimivaihteluväliä tuoreella polttoaineella.

MCNP-laskujen perusteella havaitaan keskiaukon säteen varioinnilla olevan juuri ja juuri tilastollisesta hajonnasta erotettavissa oleva vaikutus systeemin kasvutekijään. Kymmenesosamillimetrin lisä keskiaukon säteeseen pienentää systeemin kasvutekijää noin 100 pcm. Serpent-laskujen pohjalta tämän voidaan arvioida johtuvan lähinnä polttoainemateriaalin vähentymisestä, koska Serpent-laskuissa ei havaittu tilastollisesta hajonnasta erottuvaa vaikutusta kasvutekijään.

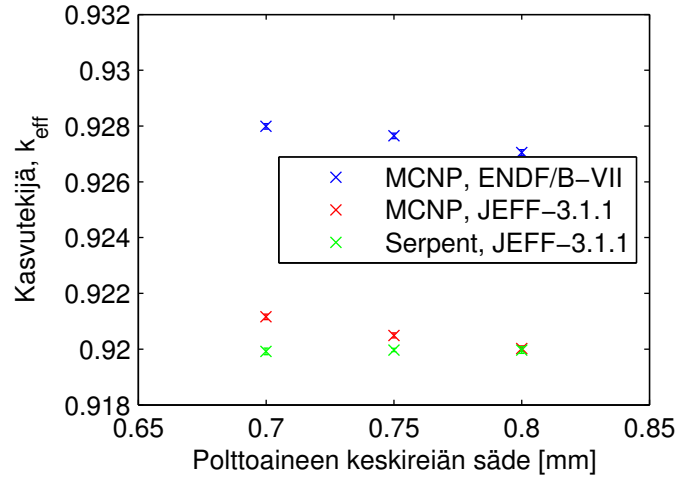
Keskiaukon säteen epävarmuus on siis melko vähäpätöinen virhetekijä kriittisyysturvallisuusanalyysissä etenkin jos polttoaineen kokonaismassa on luotettavasti tiedossa.

Taulukko 3. Polttoaineen keskireiän säteen vaikutus systeemin kasvutekijään

	MCNP						Serpent		
	ENDF/B-VII			JEFF-3.1.1			JEFF-3.1.1		
[mm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
0.75	0.92765	10		0.92049	9		0.91998	6	
0.70	0.92799	10	34	0.92116	10	66	0.91992	12	-6
0.80	0.92705	10	-59	0.92002	10	-47	0.91997	12	-1

3.2 Pelletin säde

Pelletin ulkosäde vaikuttaa sekin yksinään tarkasteltuna polttoaineen kokonaismäärään. Edellisen kohdan tapaan Serpent-laskuissa korjattiin polttoaineen tiheyttä säteen mukana siten että polttoaineen kokonaismäärä säilyi vakiona. Serpent-laskuissa kaasuaukon ja



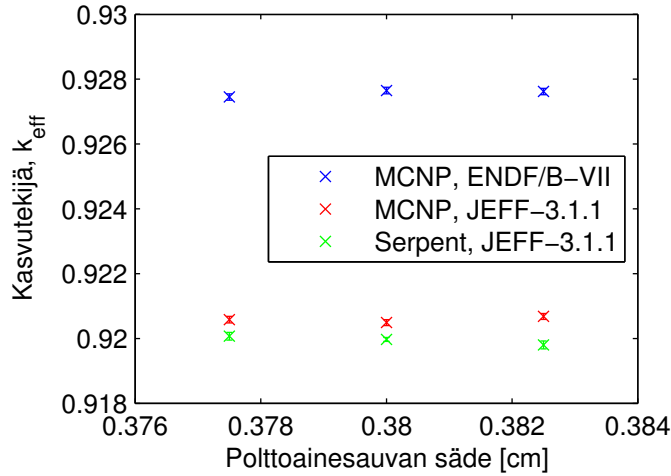
Kuva 2. Polttoainepelletin keskiaukon säde vaikuttaa heikosti systeemin kasvutekijään. Kuitenkin, jos polttoaineen kokonaismassa pidetään vakiona sen tiheyttä muokkaamalla (Serpent-lasku), mitään vaikutusta kasvutekijään ei havaita.

suojakuoren ulkosäteet pidettiin nominaaliarvoissaan. MCNP-laskuissa ei korjausta polttoaineen kokonaismäärän suhteen tehty, mutta sen sijaan kaasuaukon ja suojakuoren paksuudet pidettiin vakioina, jolloin polttoainesauva ikään kuin pullistui polttoaineen mukana. Aukon säteen vaihteluväli 0.3775–0.3825 cm valittiin kuvaamaan maksimivaihteluväliä tuoreella polttoaineella.

Kaikki tutkitut pelletin säteen aiheuttamat muutokset hukkuivat tilastolliseen vaihteluun. On mahdollista, että MCNP-laskuissa olisi havaittu pieni vaikutus kasvutekijään, jos sauvan ei olisi annettu paisua polttoaineen mukana. Näissä MCNP-laskuissa polttoaineen kokonaismäärän muutoksen reaktiivisuusvaikutus ilmeisesti kumoutuu, koska sauvan muodonmuutoksen myötä sauvojen välisen moderaattorin määrä muuttuu. Paikallisesti alimoderoidussa nipussa moderoinnin muutoksen reaktiivisuusvaikutus on aina vastakkainen polttoainetilavuuden vaikutuksen kanssa.

Taulukko 4. Polttoaineen säteen vaikutus systeemin kasvutekijään.

	MCNP						Serpent		
	ENDF/B-VII			JEFF-3.1.1			JEFF-3.1.1		
[mm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
3.80	0.92765	10		0.92049	9		0.91998	6	
3.775	0.92745	10	-19	0.92058	10	8	0.92007	12	8
3.825	0.92762	10	-2	0.92068	9	19	0.91980	12	-17



Kuva 3. Polttoainepelletin säteen ei havaittu vaikuttavan systeemin kasvutekijään, jos polttoaineen tiheyttä korjattiin siten, että polttoaineen kokonaismäärä pysyi vakiona (Serpent) tai, jos polttoainesauvan oletettiin muuttavan muotoaan polttoaineen mukana (MCNP).

3.3 Kaasuaukon leveys

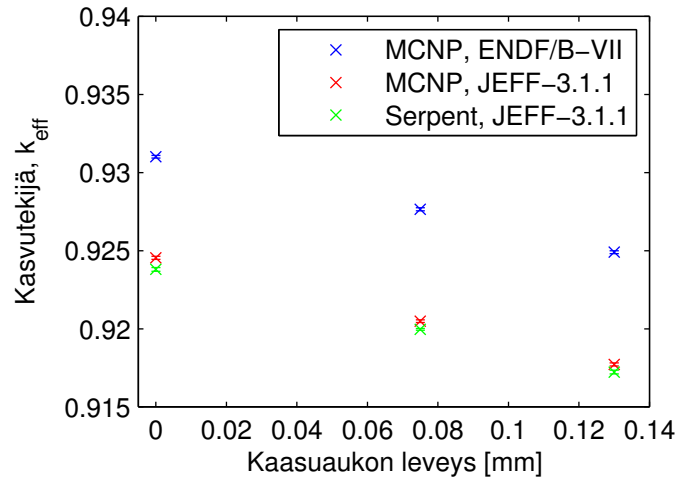
Tyypillisissä polttoainesauvoissa pelletin ja suojakuoren välissä on heliumilla tai jollakin muulla täytekaasulla täytetty kaasutila. Kun polttoainetta käytetään reaktorissa, polttoaine pullistuu jonkin verran ja toisaalta suojakuori viruu hitaasti sisään päin. Tämän seurauksena kaasuaukko yleensä umpeutuu jossakin polttoainesauvan elinkaaren vaiheessa.

Kaasuaukon leveyttä tutkittiin niin, että polttoainepelletin säde ja suojakuoren paksuus pidettiin vakioina. Tämän seurauksena polttoainesauva paisuu kaasuaukon mukana. Suurin vaikutus reaktiivisuuteen lieneekin seurausta polttoainesauvan syrjäyttämän moderaattorin määrän vaihtelusta eikä niinkään neutronien kannalta läpinäkyvän kaasuaukon levenemisestä. Kaasuaukon leveyden vaihteluväliksi valittiin 0.0 – 0.013 cm.

Tuloksista havaitaan, että valituin oletuksin kaasuaukon leveys vaikuttaa systeemin kasvutekijään noin 500 pcm/0.01 cm. Kaasuaukon leveyttä voidaan siis pitää jossakin määrin merkittävänä parametrina kriittisyysturvallisuusanalyyseissä.

Taulukko 5. Kaasuaukon leveyden vaikutus systeemin kasvutekijään.

	MCNP						Serpent		
	ENDF/B-VII			JEFF-3.1.1			JEFF-3.1.1		
[mm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
0.075	0.92765	10		0.92049	9		0.91998	6	
0.0	0.93102	9	336	0.92455	10	405	0.92381	12	383
0.13	0.92491	9	-273	0.91772	10	-277	0.91723	12	-275



Kuva 4. Jos polttoainesauvan annetaan paisua kaasuaukon mukana (suojakuoren paksuus vakio), kaasuaukon leveydellä havaitaan olevan kohtalainen vaikutus reaktiivisuuteen.

3.4 Suojakuoren paksuus

Suojakuoren paksuus vaikuttaa reaktiivisuuteen kahdella tapaa. Heikosti sirottavan ja absorboivan suojakuorimateriaalin määrä systeemissä lisääntyy suojakuoren paksuuntumisen (tai kääntäen ohenemisen) myötä. Lisäksi paisuva polttoainesauva syrjäyttää moderaattorina toimivaa vettä, mikä vähentää moderointia nipun sisällä.

Simulointien perusteella suojakuoren paksuus vaikuttaa merkittävästi systeemin kasvutekijään. Kasvutekijä pienenee noin 600 pcm samalla kun suojakuori paksune 0.01 cm.

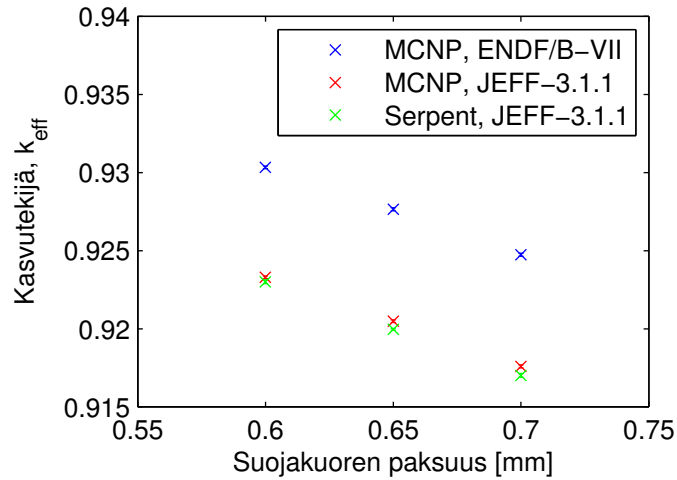
Taulukko 6. Suojakuoren paksuuden vaikutus systeemin kasvutekijään.

	MCNP						Serpent		
	ENDF/B-VII			JEFF-3.1.1			JEFF-3.1.1		
[mm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
0.65	0.92765	10		0.92049	9		0.91998	6	
0.60	0.93034	9	268	0.92330	9	280	0.92301	12	302
0.70	0.92475	10	-290	0.91759	10	-290	0.91702	12	-295

3.5 Virtauskanavan kotelon sisäsäde

Säännöllisen kuusikulmion muotoisen virtauskanavan sisäsäteellä tarkoitetaan tässä tapauksessa lyhintä etäisyyttä kanavan keskipisteestä kotelon sisäseinämän. Sisäsäde vaikuttaa lähinnä siihen, kuinka lähellä polttoainesauvoja kotelo syrjäyttää moderaattorimateriaalia. Sisäsäteen kasvattaminen lisää myös hieman systeemissä olevan kotelomateriaalin määrää, koska seinämän paksuus pidettiin vakiona.

Virtauskanavan kotelon sisäsäteellä ei havaittu tilastollisesta hajonnasta erottuvaa vaikutusta systeemin kasvutekijään. Näin ollen sisäsäteen mahdolliset epävarmuudet eivät näy

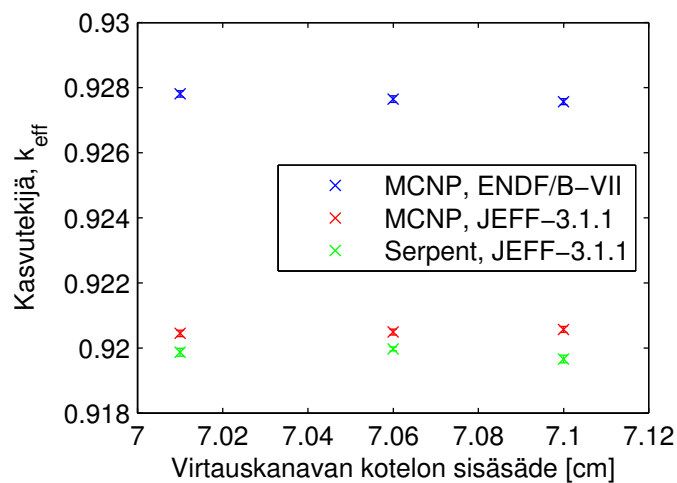


Kuva 5. Suojakuoren paksuus vaikuttaa merkittävästi systeemin kasvutekijään.

kriittisyysturvallisuustarkasteluiden tuloksissa.

Taulukko 7. Virtauskanavan sisäsäteen vaikutus systeemin kasvutekijään.

	MCNP						Serpent		
	ENDF/B-VII			JEFF-3.1.1			JEFF-3.1.1		
[cm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
7.06	0.92765	10		0.92049	9		0.91998	6	
7.01	0.92781	10	16	0.92045	10	-4	0.91987	12	-10
7.10	0.92757	9	-7	0.92057	9	7	0.91966	12	-31



Kuva 6. Virtauskanavan kotelon sisäsäteen vaikutus kasvutekijään ei erotu tilastollisesta hajonnasta.

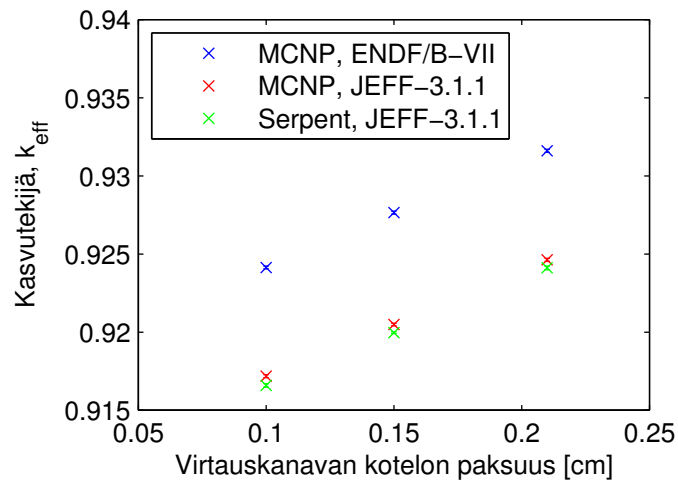
3.6 Virtauskanavan kotelon paksuus

Virtauskanavan kotelon paksuus vaikuttaa reaktiivisuuteen samojen mekanismien kautta kuin suojakuoren paksuuskin. Olennaisena erona virtauskanava syrjäyttää moderaattoria ylimoderoidulla alueella polttoainien välissä, kun taas suojakuori syrjäyttää vettä alimoderoiduissa nipun sisäosissa. Tämän vuoksi virtauskanavan kotelon paksuuden vaikutus on vastakkainen kuin suojakuorella: kotelon paksuuntuminen lisää kasvutekijää.

Tulosten perusteella 0.1 cm lisä virtauskanavan kotelon paksuuteen lisää kasvutekijää noin 670 pcm, joten virtauskanavan kotelon paksuus vaikuttaa merkittävästi systeemin kasvutekijään.

Taulukko 8. Virtauskanavan kotelon paksuuden vaikutus systeemin kasvutekijään.

[cm]	MCNP						Serpent		
	ENDF/B-VII			JEFF-3.1.1			JEFF-3.1.1		
	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
0.15	0.92765	10		0.92049	9		0.91998	6	
0.10	0.92414	9	-351	0.91718	10	-331	0.91659	12	-339
0.21	0.93161	10	396	0.92463	10	413	0.92412	12	414



Kuva 7. Virtauskanavan kotelon paksuus vaikuttaa merkittävästi systeemin kasvutekijään.

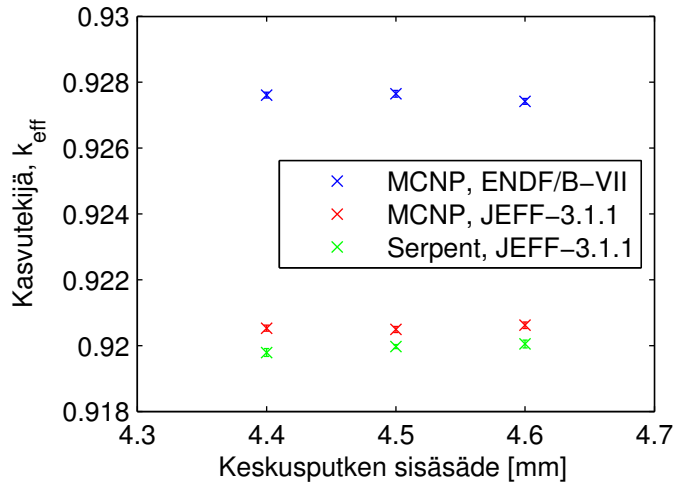
3.7 Keskusputken sisäsäde ja paksuus

Suojakuorimateriaalista valmistettu nipun keskusputki sijaitsee nipun keskellä. Siitä käytetään myös nimeä instrumentointiputki. Normaalisti putki sisältää vettä. Keskusputki vaikuttaa reaktiivisuuteen samoilla mekanismeilla kuin suojakuori ja virtauskanavan kotelo. Tutkimuksessa valittiin keskusputken sisäsäteen vaihteluväliksi 0.44 – 0.46 cm ja paksuuden vaihteluväliksi 0.06 – 0.07 cm.

Tuloksissa ei havaittu keskusputken sisäsäteen tai paksuuden vaikuttavan merkittävästi systeemin kasvutekijään. Toisin sanoen mahdollisia muutoksia ei voinut erottaa tilastollisesta hajonnasta. Keskusputken sisäsäteen ja paksuuden epävarmuudet eivät siten käytännössä aiheuta virhettä kriittisyysturvallisuusanalyysiin.

Taulukko 9. Keskusputken sisäsäteen vaikutus systeemin kasvutekijään.

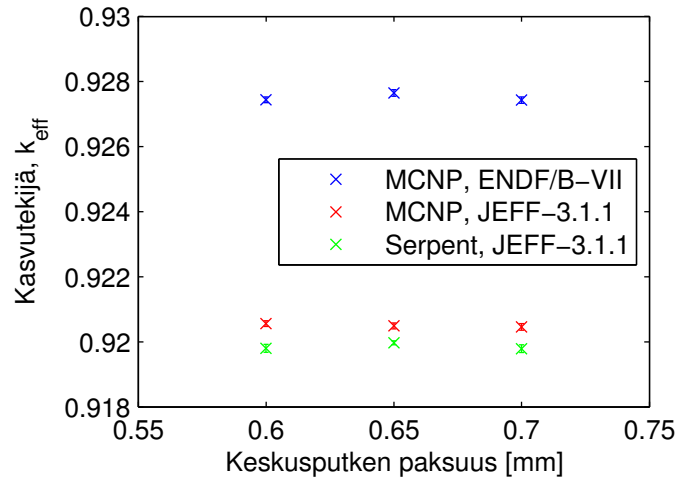
[mm]	MCNP						Serpent		
	ENDF/B-VII			JEFF-3.1.1			JEFF-3.1.1		
	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
4.5	0.92765	10		0.92049	9		0.91998	6	
4.4	0.92761	9	-3	0.92053	9	3	0.91979	12	-18
4.6	0.92742	9	-22	0.92062	10	12	0.92005	12	7



Kuva 8. Keskusputken sisähalkaisijan ei havaittu vaikuttavan systeemin kasvutekijään.

Taulukko 10. Keskusputken paksuuden vaikutus systeemin kasvutekijään.

[mm]	MCNP						Serpent		
	ENDF/B-VII			JEFF-3.1.1			JEFF-3.1.1		
	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
0.65	0.92765	10		0.92049	9		0.91998	6	
0.60	0.92744	9	-20	0.92056	9	7	0.91980	12	-17
0.70	0.92743	10	-21	0.92046	10	-3	0.91979	12	-18



Kuva 9. Keskusputken paksuuden ei havaittu vaikuttavan kasvutekijään valitulla tarkasteluvälillä.

3.8 Sauvojen siirtyminen

Käytön myötä reaktorin polttoainesauvat saattavat taipua kaaren muotoon (engl. rod bow) [8]. Tällaisen geometriamuutoksen vaikutusta systeemin kasvutekijään voidaan arvioida siirtämällä yhtä sauvaa kerrallaan 0.157 cm, eli mahdollisimman kauas oman sauvakoppinsa sisällä. Sauvoiksi valittiin kahden kuusikulmion kulman välissä suorassa linjassa olevat polttoainesauvat järjestyksessä kulmasta kulmaan. Kaikkia sauvoja poikkeutettiin samaan suuntaan, eli 6 ensimmäisen sauvan tapauksessa kohti nipun keskustaa ja 6 viimeisen sauvan tapauksessa pois päin keskustasta.

Sauvan poikkeaman vaikutus systeemin kasvutekijään erottuu selvästi tilastollisesta hajonnasta ainoastaan sauvan numero 1 kohdalla, eli siirrettäessä kulmasauvaa kohti nipun keskustaa. Tässä tapauksessa poikkeama pienentää systeemin kasvutekijää noin 100 pcm. Tulos johtunee polttoainenipun paikallisesta alimoderoinnista: kulmasauvan siirtäminen kohti nipun keskustaa vähentää polttoainesauvojen ympäristössä olevan moderaattorin määrää, mikä paikallisesti alimoderoidussa tapauksessa johtaa kasvutekijän pienentymiseen.

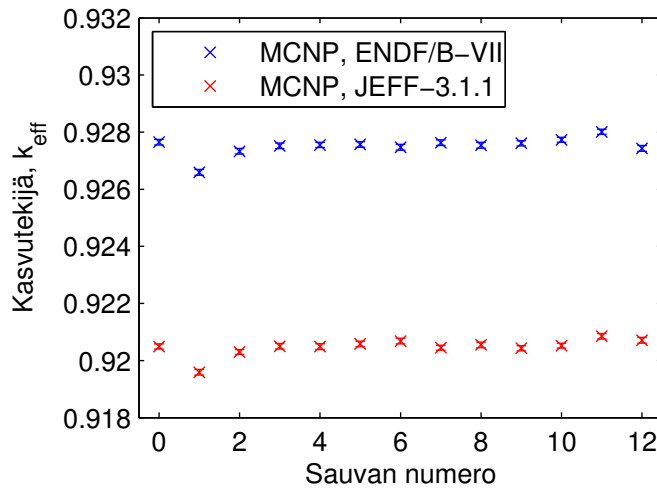
Johtopäätöksenä yhden sauvan siirtyminen tai taipuminen ei tyypillisessä varastogeometriassa aiheuta merkittäviä poikkeamia systeemin kasvutekijään – ainakaan positiiviseen (epäkonservatiiviseen) suuntaan. Tilanne saattaisi muuttua, mikäli polttoaineniput olisi sijoitettu tiheämpään hilaan.

Kuitenkin useamman sauvan yhtäaikainen taipuminen pois päin nipun keskustasta lisäisi mitä todennäköisimmin kasvutekijää samaan tapaan kuin polttoainesauvojen hilavälin kasvattaminen. Jos pidetään 0.157 cm siirtymää maksimimittana ja sauvat taipuisivat sopivasti hilan muodon säilyttäen, taipumat vastaisivat nipun keskellä (aksiaalisuunnassa) $2 \times 0.157 \text{ cm} / 12 = 0.026 \text{ cm}$ lisäystä polttoaineiden hilaväliin. Luvun 3.9 perusteella tällaisella taipumalla voidaan arvioida olevan merkittävä reaktiivisuusvaikutus. Toisaalta vaikutus jää huomattavasti pienemmäksi kuin näin laskemalla saatava 1700 pcm/0.1 cm maksimipoikkeama, koska taipumispoikkeama pienenee sauvojen päitä kohti.

Näin ollen polttoainesauvojen taipumisen mahdollinen positiivinen vaikutus kasvutekijään kannattaa pitää mielessä kriittisyysturvallisuusanalyysissä, vaikka yhden sauvan tapauksessa havaittiinkin ainoastaan muutosta konservatiiviseen suuntaan.

Taulukko 11. Yksittäisen sauvan siirtymän vaikutus systeemin kasvutekijään.

sauvan numero	MCNP					
	ENDF/B-VII			JEFF-3.1.1		
	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
0	0.92765	10		0.92049	9	
1	0.92659	10	-105	0.91959	10	-90
2	0.92733	10	-31	0.92030	9	-19
3	0.92752	10	-12	0.92050	10	0
4	0.92755	9	-9	0.92049	10	0
5	0.92757	10	-7	0.92058	10	8
6	0.92747	10	-17	0.92068	10	19
7	0.92763	10	-2	0.92045	9	-4
8	0.92754	10	-10	0.92055	10	5
9	0.92761	9	-3	0.92043	9	-6
10	0.92773	9	8	0.92052	9	2
11	0.92801	9	36	0.92085	10	35
12	0.92743	10	-21	0.92071	10	21



Kuva 10. Useimpien sauvojen kohdalla sauvan siirtymän vaikutus kasvutekijään hukkuu tilastolliseen hajontaan, mutta pieni negatiivinen vaikutus havaitaan, kun kulmassa olevaa sauvaa siirretään kohti polttoainepun keskustaa. Poikkeama sauvalle 0 vastaa nominaalitapausta, jossa kaikki sauvat ovat alkuperäisillä paikoillaan.

3.9 Polttoainesauvojen hilaväli

Polttoainesauvojen hilaväli kertoo kahden vierekkäisen sauvan keskipisteiden välisen etäisyyden polttoainepussa. Toisin sanoen se kuvaa, kuinka tiheässä sauvat ovat polttoaine-

nipun sisällä ja siten määrittää tärkeän nipun ominaisuuksia kuvaavan parametrin, moderaattorin ja polttoaineen paikallisen suhteen nipun sisällä. Nipun sisäosien neutronispektri riippuu pitkälti tästä suhteesta. Mitä enemmän moderaattoria on suhteessa polttoaineeseen, sitä termisempi tai ”pehmeämpi” on neutronispektri. Vastaavasti pienentämällä moderaattorin määrää saavutetaan nopeampi tai ”kovempi” neutronispektri.

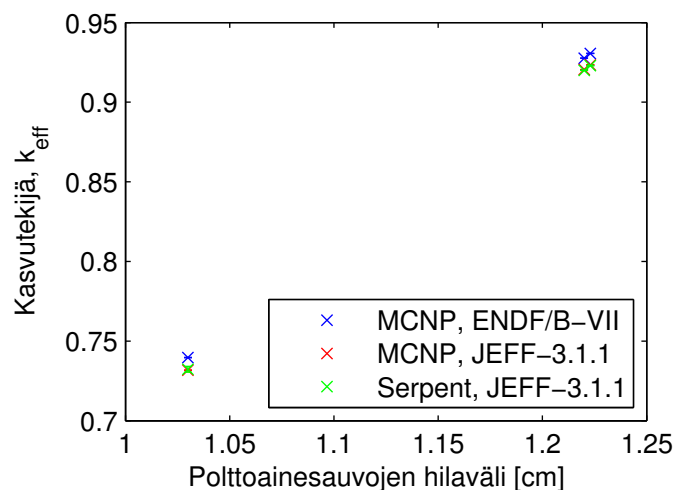
Neutronispektrin voimakas vaikutus näkyy simulointituloksissa. Hilavälin muutos 1.03 – 1.223 cm lisää kasvutekijää noin 19000 pcm. Koska kasvutekijä kasvaa myös nominaalitapauksen 1.22 cm ja maksimiarvon 1.223 cm välillä, voidaan polttoainenipun nominaalitapauksen päätellä olevan paikallisesti alimoderoitu. Kokonaisuutena polttoaineriippujen muodostama hila on kuitenkin ylimoderoitu. Minimiarvo on valittu laskuteknisistä syistä keskusputken halkaisijan mukaan. Maksimiarvo on puolestaan valittu niin, että kaikki sauvat mahtuvat edelleen virtauskanavan sisään.

Polttoaineen hilaväli on erittäin merkittävä systeemin kasvutekijään vaikuttava parametri, ja jo millimetrin sadasosien poikkeamien vaikutus on nähtävissä tuloksissa. Koska zirkoniumin (tyypillinen materiaali polttoaineriippujen rakenteissa) lineaarinen lämpölaajenemiskerroin on noin $5.5 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ [9], 600 asteen lämpötilaero aiheuttaa tutkitun 0.02 mm muutoksen hilaväliin. Näin ollen käytännön analyysissä tulee hilavälin osalta olla tarkkana, onko dimensiot ilmoitettu huoneenlämmössä vai reaktoriolosuhteissa.

Tulosten perusteella on syytä epäillä, että myös sauvojen siirtymisellä tai taipumisella

Taulukko 12. Polttoainesauvojen hilavälin vaikutus systeemin kasvutekijään.

	MCNP						Serpent		
	ENDF/B-VII			JEFF-3.1.1			JEFF-3.1.1		
[cm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
1.220	0.92765	10		0.92049	9		0.91998	6	
1.030	0.73964	9	-18801	0.73175	10	-18874	0.73232	250	-18766
1.223	0.93061	9	296	0.92341	10	291	0.92297	12	298



Kuva 11. Polttoainesauvojen hilaväli vaikuttaa hyvin voimakkaasti kasvutekijään.

saattaisi olla merkittävä vaikutus systeemin reaktiivisuuteen. Tätä ilmiötä on tarkasteltu erikseen luvussa 3.8.

3.10 Polttoainenippujen hilaväli

Polttoainenippujen hilaväli kertoo vierekkäisten polttoainenippujen keskipisteiden välisen etäisyyden hilageometriassa. Valitun vaihteluvälän pienin hilaväli 14.4 cm vastaa reaktoriosuhteita, kun taas suurin hilaväli 25 cm vastaa tyypillisiä varasto-olosuhteita.

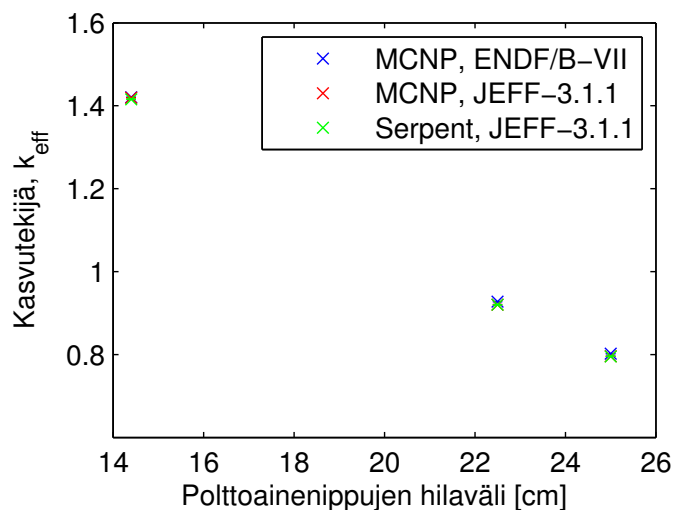
Samaan tapaan kuin edellä tarkasteltu polttoainesauvojen hilaväli, polttoainenippujen hilaväli vaikuttaa moderaattorimateriaalin ja polttoainemateriaalin määrän suhteeseen sys-

Taulukko 13. Tarkasteltuja polttoainenippujen hilavälejä vastaavat pinta-alasuhteet 2 dimensiossa A_m/A_f . Alaindeksit m ja f kuvaavat moderaattoria ja polttoainetta, vastaavasti.

hilaväli [cm]	M/F -suhde A_m/A_f
14.4	2.14
22.5	6.67
25.0	8.47

Taulukko 14. Nippujen hilavälän vaikutus systeemin kasvutekijään.

[cm]	MCNP						Serpent		
	ENDF/B-VII			JEFF-3.1.1			JEFF-3.1.1		
	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
22.5	0.92765	10		0.92049	9		0.91998	6	
14.4	1.42060	8	49295	1.41936	8	49886	1.41571	39	49573
25.0	0.80203	10	-12561	0.79600	10	-12448	0.79556	16	-12441



Kuva 12. Myös polttoainenippujen hilaväli vaikuttaa hyvin merkittävästi kasvutekijään.

teemissä. Se käytännössä määrää polttoaineniippujen välissä olevan veden määrän. Jos zirkonium lasketaan moderaattorimateriaaliksi, saadaan tarkasteltujen tapausten M/F-suhteiksi taulukkoon 13 lasketut arvot.

Tarkasteluvälillä nipun reaktiivisuus muuttui keskimäärin 5850 pcm/cm. Ylimoderoinnista johtuen hilavälin pienennys johtaa reaktiivisuuden kasvuun. Tulosten perusteella niippujen hilaväliä voidaan pitää erittäin merkittävänä reaktiivisuuteen vaikuttavana tekijänä ja siksi myös niippujen hilavälin kanssa kannattaa olla erityisen tarkkana kriittisyysturvallisuusanalyysissä tehtäessä.

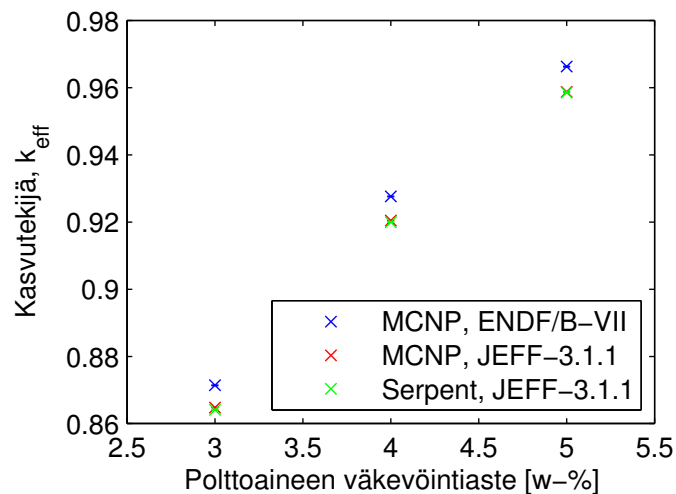
3.11 Polttoaineen väkevöintiaste

Polttoaineen väkevöinti kertoo, kuinka suuri osuus polttoaineen uraanista on fissiiliä ^{235}U -isotooppia. Kevytvesireaktoreiden polttoaineen väkevöinti vaihtelee yleensä suurin piirtein välillä 3 – 5 %, mikä valittiin väkevöintiasteen vaihteluväliksi myös tässä tutkimuksessa.

Tulosten perusteella polttoaineen väkevöintiaste vaikuttaa voimakkaasti polttoaineniipun kasvutekijään. Äärettömän systeemin kasvutekijä kasvaa noin 5000 pcm/1 %. Muutos ei kuitenkaan ole aivan lineaarinen, vaan kasvutekijä näyttäisi kasvavan hieman hitaammin

Taulukko 15. Polttoaineen väkevöintiasteen vaikutus systeemin kasvutekijään.

[w-%]	MCNP						Serpent		
	ENDF/B-VII			JEFF-3.1.1			JEFF-3.1.1		
	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
4.0	0.92765	10		0.92049	9		0.91998	6	
3.0	0.87140	9	-5625	0.86479	9	-5570	0.86408	12	-5590
5.0	0.96630	10	3865	0.95880	10	3830	0.95859	12	3861



Kuva 13. Polttoaineen väkevöintiasteen kasvattaminen lisää huomattavasti systeemin kasvutekijää.

korkeammilla väkevöinneillä.

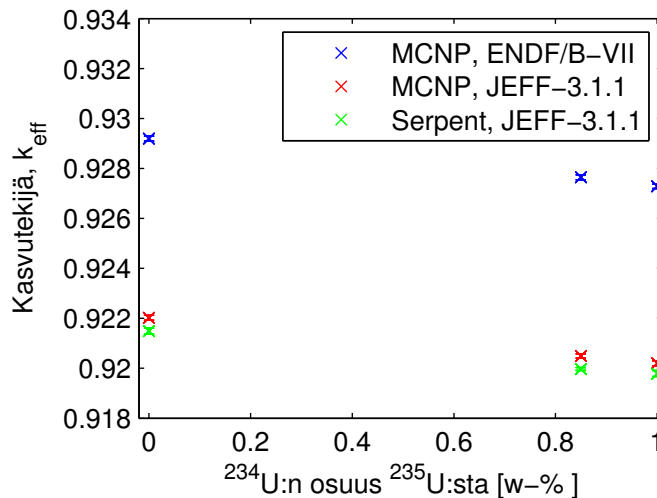
Mikäli matalammalle väkevöinnille suunniteltuun polttoainealtaaseen ladattaisiin vahingossa yhdenkin prosentin suunnitteluarvoa väkevämpää polttoainetta, kriittisysonnettomuus olisi mahdollinen, sikäli kun polttoainealtaan suunnittelussa on käytetty suunniteluperustetta $k_{\text{eff}} < 0.95$. Täytyy kuitenkin huomioida, että yksittäisen korkeaväkevöintisen nipun vaikutus suuressa altaassa tuskin riittäisi saattamaan systeemiä kriittiseksi. Nämä laskut tehtiin äärettömälle hilalle, jossa kaikkien nippujen väkevöintiä muutettiin samanaikaisesti.

3.12 ^{234}U osuus ^{235}U :sta

^{234}U on luonnossa esiintyvä uraanin isotooppi, jonka massaosuus luonnonuraanissa on vain 0.0054 % [10]. Koska uraanin isotooppiväkevöintitekniikat perustuvat uraanin nuklidien massaeroihin, väkevöityy polttoainemateriaali myös ^{234}U suhteen samalla, kun fissiiliin ^{235}U osuutta pyritään kasvattamaan. ^{234}U :n osuus ilmoitetaan yleensä prosentteina ^{235}U :n massasta, mutta sen osuus vähennetään analyyseissä ^{238}U :n massasta. Luonnonuraanissa tämä massaosuus on noin 0.76 %, väkevöidyssä uraanissa huomattavasti suurempi. Vaihteluväliksi valittiin tässä analyysissä 0 – 1 %.

Taulukko 16. ^{234}U :n osuuden ^{235}U :sta vaikutus systeemin kasvutekijään.

	MCNP						Serpent		
	ENDF/B-VII			JEFF-3.1.1			JEFF-3.1.1		
[w-%]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
0.85	0.92765	10		0.92049	9		0.91998	6	
0.0	0.92919	10	153	0.92202	10	152	0.92149	12	151
1.0	0.92728	9	-36	0.92020	10	-29	0.91979	12	-19



Kuva 14. Polttoaineen ^{234}U -pitoisuudella on heikko negatiivinen vaikutus kasvutekijään.

Reaktorifysikaalisilta ominaisuuksiltaan ^{234}U on heikko neutronimyrkky, eli se kaappaa neutroneita. Sen terminen kaappausvaikutusala on kuitenkin melko pieni 87.53 barn [11].

Simulointien tuloksista havaitaan ^{234}U osuuden pienentävän äärettömän systeemin kasvutekijää noin 170 pcm/1 w-% ^{235}U :stä. Nuklidin merkitys kriittisyysturvallisuusanalyysissä on siis suhteellisen pieni. Koska ^{234}U määrän lisääntyminen pienentää kasvutekijää, nuklidin huomioimatta jättäminen (olettamalla ^{238}U :ksi) johtaa konservatiivisiin arvioihin systeemin reaktiivisuudesta. Yksinkertaistussyistä nuklidi voidaan siis jättää huomioimatta kriittisyysturvallisuusanalyysissä.

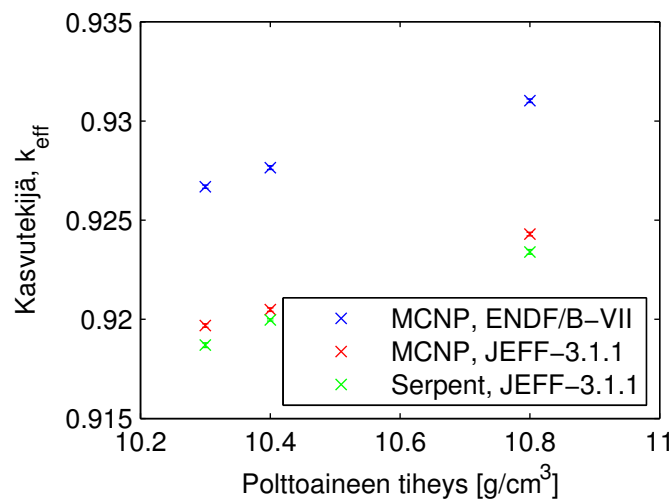
3.13 Polttoaineen tiheys

Polttoaineen tiheys vaikuttaa uranidioksidin ja sitä kautta systeemissä olevan fissiilin aineen kokonaismäärään. Tarkasteluväliksi valittiin tässä työssä 10.3 – 10.8 g/cm³.

Tuloksista nähdään, että polttoaineen tiheyden vaikutus systeemin kasvutekijään on merkittävä, mutta valitun vaihteluvälin alueella ei kuitenkaan erityisen suuri. Kasvutekijä kasvaa noin 90 pcm/0.1 g/cm³. Tiheyden muutos 0.1 g/cm³ on prosentuaalisesti noin 1 %.

Taulukko 17. Polttoaineen tiheyden vaikutus systeemin kasvutekijään.

[g/cm ³]	MCNP						Serpent		
	ENDF/B-VII			JEFF-3.1.1			JEFF-3.1.1		
	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
10.4	0.92765	10		0.92049	9		0.91998	6	
10.3	0.92669	9	-95	0.91969	9	-80	0.91870	12	-127
10.8	0.93103	9	338	0.92430	9	380	0.92340	12	341



Kuva 15. Systeemin kasvutekijä kasvaa polttoaineen tihentymisen myötä.

3.14 Suojakuoren tiheys

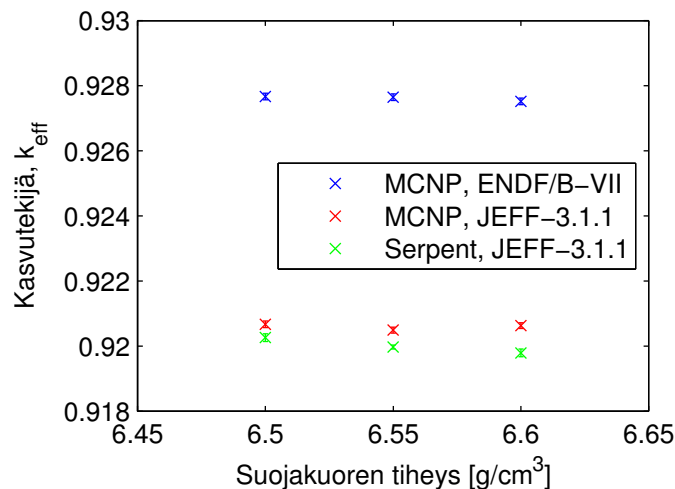
Tarkastellun VVER-nipun polttoaineen suojakuori koostuu zirkoniumista, Zr, johon on seostettu 1 w-% niobiumia, Nb. Zirkoniumin seassa on myös epäpuhtautena 0.01 w-% hafniumia, Hf. Koostumus on annettu myös taulukossa 2.

Reaktorifysikaalisilta ominaisuuksiltaan zirkonium ja niobium ovat varsin neutraaleja: termiset kokonaisvaikutusalat ovat pienet sekä luonnonzirkoniumilla että ^{93}Nb :llä, joka on ainoa luonnossa esiintyvä isotooppi. Suurin kontribuutio tähän vaikutusalaan tulee siron-tareaktioista. Hafnium sen sijaan on keskitason neutronimyrkky. Luonnossa esiintyvän isotoopin 177 (18.6 w-% luonnon Hf:sta) terminen kaappausvaikutusala on 338 barn [11]. Suojakuoren tiheyden vaihteluväliksi valittiin tähän tutkimukseen 6.5 – 6.6 g/cm³.

Kasvutekijöiden muutokset tuloksissa ovat niin pieniä, että ne hukkuvat tilastolliseen vaihteluun. Näin ollen suojakuoren tiheyden epävarmuudet eivät käytännössä aiheuta virhettä kriittisyysturvallisuusanalyysiin.

Taulukko 18. Suojakuoren tiheyden vaikutus systeemin kasvutekijään

[g/cm ³]	MCNP						Serpent		
	ENDF/B-VII			JEFF-3.1.1			JEFF-3.1.1		
	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
6.55	0.92765	10		0.92049	9		0.91998	6	
6.50	0.92767	10	2	0.92067	10	17	0.92026	12	28
6.60	0.92752	10	-12	0.92063	9	13	0.91979	12	-19



Kuva 16. Suojakuoren tiheyden vaikutus systeemin kasvutekijään ei erotu tilastollisesta vaihtelusta.

3.15 Jäähdytteen tiheys

Kevytvesireaktoreissa vesi toimii paitsi jäähdytteenä myös moderaattorimateriaalina. Vedessä tapahtuvat sironnat hidastavat fissioissa syntyviä neutroneita termiselle energia-alueelle, jossa fission aiheuttamisen todennäköisyys nousee huomattavasti korkeammaksi kuin suurilla energioilla. Veden tiheys vaihtelee suhteellisen paljon lämpötilan funktiona, mutta käytännön tilanteissa vaihteluväli on noin välillä 0.6 – 1.0 g/cm³. Varastoaltaat ovat yleensä ilmakehän paineessa, joten reaktorin ulkopuolella vaihteluväli on noin 0.958 – 1.0 g/cm³ [12]. Tätä pienempiä tiheyksiä voidaan käyttää arvioimaan jäähdytteen menetystä eli pinnankorkeuden laskua.

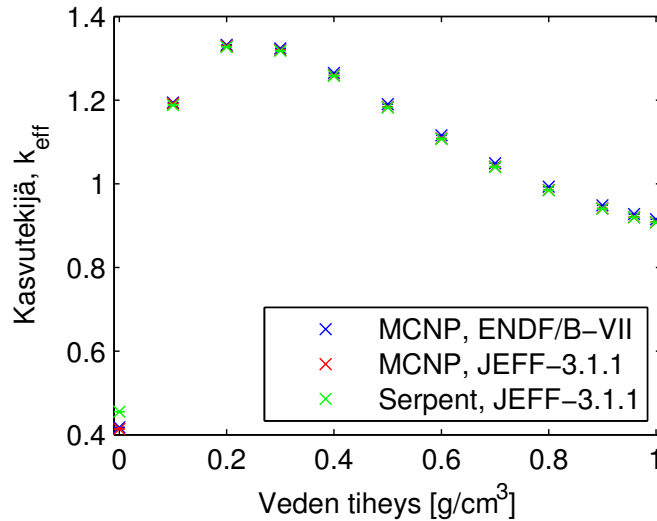
Lisäksi tuoreen polttoaineen kuljetussäiliön kriittisyysturvallisuusanalyysissä pitää IAEA:n säännösten [13] mukaan ottaa huomioon moderaattorin menetys. Tapaa, jolla tämä otetaan huomioon ei kuitenkaan ole määritely. Tästä syystä haluttiin tässä työssä vertailla tiheysmuutoksen ja pinnankorkeuden muutoksen vaikutuksia reaktiivisuuteen. Tuloksia veden pinnankorkeuden laskun vaikutuksesta löytyy luvusta 3.16.

Tuloksista havaitaan mallinnetun varastohilan olevan voimakkaasti ns. ylimoderoitu. Toisin sanoen moderaattoria on niin paljon, että sen absorboiva vaikutus ylittää tehostuneen moderoinnin tuoman lisän kasvutekijään. Kun moderaattorin tiheys laskee nominaalivarostaan 0.9591, kasvutekijä kasvaa voimakkaasti ja ylittää kriittisyyden rajan, $k_{\text{eff}} = 1$, jo noin 0.7 g/cm³ kohdalla. Suurin kasvutekijä saavutetaan noin tiheydellä 0.2 g/cm³, jota pienemmillä arvoilla systeemi on alimoderoitu ja kasvutekijä siksi laskee tiheyden mukana.

Moderaattorin tiheydellä 0.0 cm³ on havaittavissa merkittävä ero Serpentillä ja MCNP:llä laskettujen kasvutekijöiden välillä. Tämä johtunee siitä, että Serpent-laskussa ei käytetty todennäköisyystaulukkomenetelmää erottamattomien resonanssien alueen vaikutusalojen korjaamiseen, minkä vuoksi polttoainesauvojen itsevarjostus mallintuu väärin. Ero on merkittävä ainoastaan nopean neutronispektrin systeemeissä, jollaiseksi tarkasteltu tilanne

Taulukko 19. Veden tiheyden vaikutus systeemin kasvutekijään.

[g/cm ³]	MCNP						Serpent		
	ENDF/B-VII			JEFF-3.1.1			JEFF-3.1.1		
	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
0.959	0.92765	10		0.92049	9		0.91998	6	
0.0	0.41755	4	-51010	0.41384	4	-50665	0.45508	23	-46490
0.1	1.19443	9	26678	1.19240	9	27190	1.18822	9	26824
0.2	1.33235	8	40469	1.32960	8	40910	1.32737	6	40738
0.3	1.32378	8	39613	1.31987	8	39938	1.31811	6	39812
0.4	1.26516	8	33751	1.25952	8	33902	1.25842	6	33844
0.5	1.19063	8	26298	1.18390	8	26340	1.18265	8	26266
0.6	1.11607	8	18841	1.10845	9	18795	1.10760	9	18761
0.7	1.04906	9	12141	1.04140	9	12091	1.04038	10	12040
0.8	0.99305	9	6540	0.98542	9	6492	0.98476	11	6477
0.9	0.94872	10	2107	0.94131	10	2081	0.94081	12	2082
1.0	0.91529	9	-1235	0.90821	10	-1228	0.90778	12	-1219



Kuva 17. Jäähdytteen tiheys vaikuttaa hyvin voimakkaasti systeemin kasvutekijään. Kuvaajasta on selvästi nähtävissä kuinka systeemi muuttuu alimoderoidusta ylimoderoiduksi jäähdytteen tiheyden ylittäessä 0.2 g/cm^3 .

muuttuu moderaattorin poistamisen myötä.

Tyypillinen varastoaltaiden ylimoderointi kannattaa aina pitää mielessä kriittisyysturvallisuusanalyysissä tehtäessä. Kasvutekijä kasvaa voimakkaasti mikäli polttoainevaraston veden tiheys syystä tai toisesta laskee. Normaali-ilmanpaineessa tiheys ei pääse laskemaan kovin alas pelkän veden lämpenemisen seurauksena, mutta esimerkiksi kaasukuplat (kiehunta) tai varastoaltaaseen tippuvat esineet saattavat syrjäyttää vettä, jolloin sen tiheys efektiivisesti laskee.

3.16 Vedenpinnan korkeus

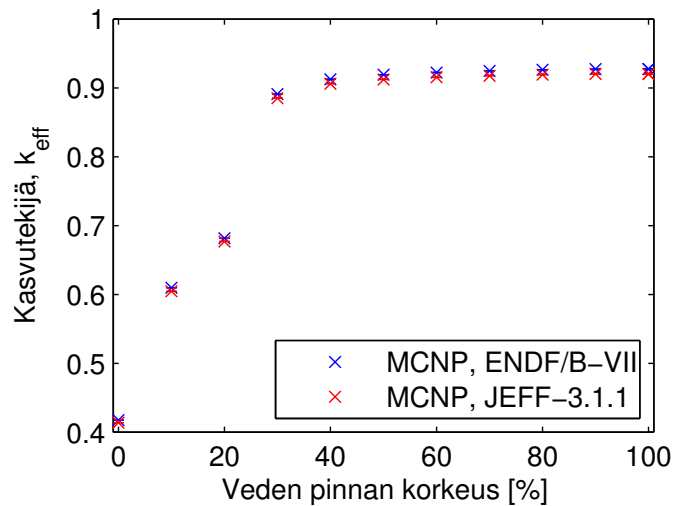
Vedenpinnan korkeus systeemissä vaikuttaa moderaattorimateriaalin sijaintiin ja määrään systeemissä. Vedenpinnan lasku on täysin mahdollinen skenaario ja voisi tapahtua polttoainealtaan vuodon seurauksena. Tarkastelulla haluttiin myös selvittää miten moderaattorin määrän vaihtelu pinnan korkeutta muuttamalla eroaa tiheyden muuntelusta, jota tarkasteltiin luvussa 3.15.

Tässä luvussa tutkittiin vedenpinnan laskun vaikutusta systeemin kasvutekijään laskemalla veden pintaa 10 % välein 100 %:sta 0 %:n, missä 100% vastaa polttoainesauvojen korkeinta ja 0 % alinta kohtaa. Tarkalleen ottaen ääritapauksessa 0 % myös polttoainesauvojen alapuolella oleva vesi poistettiin ja 100 % tapaus vastasi nominaalitapausta, jossa nipun yläpuolella on vesiheijastin.

Tuloksista havaitaan vedenpinnan korkeudella olevan suuri vaikutus systeemin kasvutekijään. Pinnan laskun aiheuttama pudotus kasvutekijässä on suhteellisen pientä noin 40 % yläpuolella, mutta pinnan laskiessa 40 % alle havaitaan jyrkkä romahdus kasvutekijässä. Missään vaiheessa kasvutekijä ei nouse yli nominaaliarvon. Kuvaajaa 18 on hyvä verrata moderaattorin tiheyden vaikutuksesta laadittuun kuvaajaan 17. Kuvaajien hyvin erilais-

Taulukko 20. Vedenpinnan korkeuden vaikutus kasvutekijään. Nominaaliarvona käytettiin 100 %.

[%]	MCNP					
	ENDF/B-VII			JEFF-3.1.1		
	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
0	0.41755	4	-51010	0.41384	4	-50665
10	0.60970	6	-31794	0.60456	6	-31593
20	0.68168	8	-24597	0.67705	8	-24344
30	0.89125	10	-3639	0.88533	10	-3516
40	0.91277	9	-1488	0.90632	10	-1417
50	0.91931	10	-834	0.91249	10	-800
60	0.92263	10	-502	0.91562	9	-487
70	0.92483	9	-281	0.91788	9	-261
80	0.92648	9	-117	0.91945	9	-104
90	0.92762	10	-2	0.92038	10	-11
100	0.92765	10		0.92049	9	



Kuva 18. Veden pinnan korkeus vaikuttaa voimakkaasti systeemin kasvutekijään.

ta muodoista voidaan päätellä, että veden poistumisella systeemistä pinnankorkeuden laskun seurauksena on kriittisyysturvallisuusmielessä huomattavasti pienempi vaikutus kuin esimerkiksi veden kiehumisella tai syrjäytymisellä jollakin sopivalla materiaalilla. Tällöin moderaattorin tiheys efektiivisesti muuttuu.

3.17 Virtauskanavan kotelon tiheys

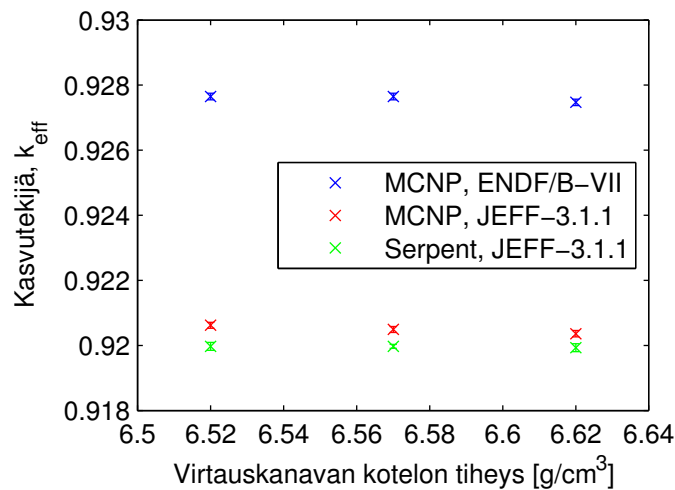
VVER-nippua ympäröi kotelo, jonka sisällä jäähdytvesi virtaa. Virtauskanavan kotelo koostuu tutkitun nipun tapauksessa hyvin suojakuoren kaltaisesta materiaalista, mutta niobiumin osuus kotelossa on hieman suurempi 2.5 w-%. Koostumus on esitetty taulukossa

2. Virtauskanavan tiheyden vaihteluväliksi valittiin $6.52 - 6.62 \text{ g/cm}^3$.

Samoin kuin suojakuoren tiheys, myöskään virtauskanavan kotelon tiheys ei tulosten perusteella vaikuta systeemin kasvutekijään valitun vaihteluvälin puitteissa. Myöskään virtauskanavan kotelon tiheyden epävarmuudet eivät siis käytännössä vaikuta kriittisyysturvallisuusanalyysien tuloksiin.

Taulukko 21. Virtauskanavan kotelon tiheyden vaikutus systeemin kasvutekijään.

[g/cm ³]	MCNP						Serpent		
	ENDF/B-VII			JEFF-3.1.1			JEFF-3.1.1		
	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
6.57	0.92765	10		0.92049	9		0.91998	6	
6.52	0.92765	10	0	0.92062	9	12	0.91997	12	-1
6.62	0.92747	10	-17	0.92036	10	-13	0.91993	12	-4



Kuva 19. Virtauskanavan kotelon tiheyden vaikutus systeemin kasvutekijään ei erotu tilastollisesta vaihtelusta.

3.18 Suojakuoren ja virtauskanavan kotelon Hf-pitoisuudet

Kuten jo aikaisemmin tuli ilmi, hafniumia on aina zirkoniumin seassa epäpuhtautena. Yleensä hafniumin osuus on noin 0.01 w-% zirkoniumin massasta. Hafniumin määrän vaikutusta kasvutekijään tutkittiin varioimalla sen pitoisuutta suojakuoressa ja virtauskanavan kotelossa nolasta viisinkertaiseen nominaalipitoisuuteen 0.05 w-%.

3.19 Suojakuoren ja virtauskanavan kotelon Nb-pitoisuudet

Tulosten perusteella Hf-pitoisuudella voidaan sanoa olevan heikon negatiivinen vaikutus kasvutekijään. Pitoisuuden viisinkertaistaminen pienentää systeemin kasvutekijää suojakuoren tapauksessa noin 150 pcm ja 75 pcm virtauskanavan kotelon tapauksessa. Haf-

Taulukko 22. Suojakuoren Hf-pitoisuuden vaikutus systeemin kasvutekijään.

Serpent JEFF-3.1.1			
[w-%]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
0.01	0.91998	6	
0.00	0.92016	12	18
0.05	0.91848	12	-150

Taulukko 23. Virtauskanavan kotelon Hf-pitoisuuden vaikutus systeemin kasvutekijään.

Serpent JEFF-3.1.1			
[w-%]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
0.01	0.91998	6	
0.00	0.92021	12	23
0.05	0.91920	12	-77

niumin pitoisuus ei siis ole kovin merkittävä epävarmuustekijä kriittisyysturvallisuusanalyseissä. Se voidaan siis analyseissä jättää pois suojakuoren ja virtauskanavan kotelon koostumuksesta, koska tämä on konservatiivinen oletus.

Suojakuori- ja virtauskanavan kotelomateriaaleihin sekoitetun niobiumin vaikutusta reaktiivisuuteen tutkittiin varioimalla Nb-pitoisuutta. Suojakuorimateriaalin tapauksessa vaihteluväli oli 0.9 – 1.1 w-% ja virtauskanavan kotelon tapauksessa 2.4 – 2.7 w-%. Kummassakaan tapauksessa ei havaittu tilastollisesta hajonnasta erottuvaa vaikutusta kasvutekijään. Näin ollen suojakuori- ja virtauskanavan kotelomateriaalin Nb-pitoisuudella ei ole käytännön vaikutusta kriittisyysturvallisuusanalyysien tuloksiin.

Taulukko 24. Suojakuoren Nb-pitoisuuden vaikutus systeemin kasvutekijään.

Serpent JEFF-3.1.1			
[w-%]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
1.0	0.91998	6	
0.9	0.91993	12	-4
1.1	0.91981	12	-17

Taulukko 25. Virtauskanavan kotelon Nb-pitoisuuden vaikutus systeemin kasvutekijään.

Serpent JEFF-3.1.1			
[w-%]	k_{eff}	σ [pcm]	Δk_{eff} [pcm]
2.5	0.91998	6	
2.4	0.91989	12	-9
2.7	0.91999	12	1

4 Yhteenveto

Tässä työssä tutkittiin polttoainenipun parametrien vaikutusta tyypillisen VVER-440 -nipun kasvutekijään, kun nippu on sijoitettuna äärettömään varastohilaan. Vaikutusta tutkittiin MCNP-ohjelmalla käyttäen kahta eri vaikutusalakirjastoa sekä Serpent-ohjelmalla yhdellä vaikutusalakirjastolla. Päällimmäisenä tarkoituksena oli selvittää, kuinka parametrien vaihteluvälit vaikuttavat kriittisyysturvallisuusanalyysien tuloksiin. Koska suurin osa laskuista tehtiin kahdella eri ohjelmalla, saatiin samalla validoitua Serpent-ohjelma MCNP:tä vasten hyvin monenlaisissa VVER-tapauksissa.

MCNP- ja Serpent-ohjelmien tulokset vastasivat erittäin hyvin toisiaan, kun molemmissa ohjelmissa käytettiin samaa vaikutusalakirjastoa JEFF-3.1.1. Nominaalitapauksessa ja lähes kaikissa tutkituissa tapauksissa MCNP- ja Serpent-laskujen kasvutekijöiden ero oli noin 50 pcm. Erot selittyvät ainakin osittain sillä, että MCNP-laskuissa käytettiin 7 K Serpenttiä pienempää lämpötilaa, jolloin MCNP käytti sisäänrakennettua termisen sironnan korjausta vaikutusaloille ja myös vapaakaasumallissa käytetty lämpötila oli hieman pienempi. Jonkin verran eroa Serpentin ja MCNP:n tuloksien välille tulee myös siitä, että Serpentissä ei käytetty todennäköisyystaulukomenetelmää erottamattomien resonanssien energia-alueella. Mikäli Serpenttiin olisi kytketty tämä ominaisuus päälle ja lisäksi nostettu MCNP:ssä käytetty lämpötila 300 K:n, olisivat tulokset mitä todennäköisimmin olleet tilastollisen hajonnan puitteissa samat. Näin on havaittu olevan monissa muissa vertailuissa [14]. Tämänkin tutkimuksen perusteella Serpenttiä voidaan pitää luotettavuudeltaan MCNP:n veroisena ohjelmana VVER-nippujen kriittisyysturvallisuusanalyysiin.

MCNP:n ENDF/B-VII -kirjastolla lasketut tulokset poikkesivat huomattavan paljon, jopa 700 pcm JEFF-3.1.1 -kirjastolla lasketuista tuloksista. Tämä ero oli kuitenkin erittäin konsistentisti kaikissa tuloksissa, joten tutkimuksen kohteena olleet muutokset kasvutekijässä vastasivat hyvin toisiaan niin kirjastojen kuin ohjelmienkin välillä.

Tuloksissa havaittiin monien parametrien vaihteluvälin olevan kriittisyysturvallisuustarkastelujen kannalta merkityksettömiä ainakin niin kauan kun muutokset pysyvät kohtuullisina. Valittujen vaihteluvälien puitteissa merkityksettömiksi parametreiksi havaittiin suoja-kuoren ja virtauskanavan kotelon tiheys, polttoaineen keskiaukon säde olettaen että polttoaineen tarkka kokonaismassa tunnetaan, polttoainepelletin säde, virtauskanavan kotelon sisäsäde, keskusputken sisäsäde, keskusputken paksuus sekä suoja-kuoren ja virtauskanavan kotelon Nb-pitoisuudet. Heikko tai kohtalainen vaikutus havaittiin olevan polttoaineen ^{234}U -pitoisuudella, polttoaineen tiheydellä, polttoaineen keskiaukon säteellä mikäli polttoaineen kokonaismassa ei ole tarkasti tiedossa, kaasuaukon leveydellä, suoja-kuoren paksuudella, virtauskanavan kotelon paksuudella, suoja-kuoren ja virtauskanavan kotelon materiaalien Hf-pitoisuuksilla sekä sauvojen taipumisella/siirtymällä. Suurimmat vaikutukset havaittiin polttoaineen väkevöintiasteella sekä moderointiin vaikuttavilla parametreilla nippujen hilaväli, sauvojen hilaväli, moderaattorin tiheys ja vedenpinnan korkeus. Yhteenveto tuloksista sekä mahdollinen suositus konservatiiviseksi approksimaatioksi tai yksinkertaistukseksi on esitetty taulukossa 26.

Yleisesti kriittisyysturvallisuusanalyysissä kannattaa kiinnittää erityisen paljon huomiota merkittäviksi havaittuihin parametreihin. Tutkimustuloksista erityisesti kasvutekijän herkkyys jo hyvin pienille, jopa lämpölaajenemisen aiheuttamille sauvojen hilavälin muutok-

sille kannattaa pitää mielessä tulevaisuudessa. Samoin varastohilojen ylimoderointi ja sen seuraukset esim. jäädytteenmenetys tai -kiehumistilanteissa on erittäin tärkeä muistaa varastohilojen turvallisuusanalyseissä.

Taulukko 26. Parametrien merkittävyys kriittisyysturvallisuudessa sekä mahdolliset muutosnopeus ja konservatiivinen approksimaatio.

Parametri	Muutosnopeus	Merkittävyys	Konservatiivinen approksimaatio
Pelletin keskireiän säde	< -100 pcm/0.1 mm	Ei juurikaan	
Pelletin säde		Ei merkitystä	
Kaasuaukon leveys	-500 pcm/0.1 mm	Jossain määrin	Todellisuutta pienempi
Suojakuoren paksaus	-600 pcm/0.1 mm	Merkittävä	Todellisuutta pienempi
Virtauskanavan kotelon paksaus	+670 pcm/0.1 cm	Merkittävä	Todellisuutta suurempi
Virtauskanavan kotelon sisäsäde		Ei merkitystä	
Keskusputken sisäsäde		Ei merkitystä	
Keskusputken paksaus		Ei merkitystä	
Yhden sauvan siirtyminen	-100 pcm/0.15 cm ^a	Ei merkitystä	Ei siirtymää tai taipumista
Polttoainesauvojen hilaväli	98000/cm	Erittäin merkittävä	Todellista suurempi
Polttoaineniippujen hilaväli	-5850 pcm/cm	Erittäin merkittävä	Todellista pienempi
Polttoaineen väkevöintiaste	5000 pcm/1 %	Erittäin merkittävä	Todellista suurempi
²³⁴ U osuus ²³⁵ U:sta	-170 pcm/1 w-%	Jossain määrin	Jätetään huomiotta ja korvataan ²³⁸ U:lla ^b
Polttoaineen tiheys	90 pcm/0.1 g/cm ³	Merkittävä	Todellista suurempi
Suojakuoren tiheys		Ei merkitystä	
Jäähdytteen tiheys ^c		Erittäin merkittävä	Todellista pienempi
Vedenpinnan korkeus	-39000 pcm/cm ^{3d}	Ei merkitystä ^d	
Virtauskanavan kotelon tiheys		Ei merkitystä	
Hf-pitoisuudet		Jossain määrin	Jätetään huomiotta ja korvataan zirkoniumilla ^b
Nb-pitoisuudet		Ei merkitystä	

^aVain kulmasauvalla

^bSuositteluaan tehtäväksi

^cKäytetään tuoreen polttoaineen kuljetussäiliön analyysissä

^dNominaalipisteen ympärillä

Viitteet

- [1] X-5 Monte Carlo Team, "MCNP - a general N-particle transport code, version 5," Report LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory (2003).
- [2] Leppänen, J., *PSG2 / Serpent - a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, Methodology - User's Manual - Validation Report* (2010), <http://montecarlo.vtt.fi/>.
- [3] "Design and performance of WWER fuel," Technical Reports Series 379, International Atomic Energy Agency, Vienna (1996).
- [4] Josek, R., Novak, E. and Rypar, V., "WWER-440 local power peaking experiment: Benchmark geometry and material specification," Tech. Rep. UJV Z1651, NRI, Rez (2006).
- [5] Szatmary, Z., *The VVER Experiments: Regular and Perturbed Hexagonal Lattices of Low-Enriched UO₂ Fuel Rods in Light Water*, LEU-COMP-THERM-015 in NEA/NSC/DOC/(95)03/IV (Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris, 1995).
- [6] *Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data* (International Atomic Energy Agency, Vienna, 2008), http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/IAEA-THPH_web.pdf.
- [7] "Wikipedia, normal distribution," http://en.wikipedia.org/wiki/Normal_distribution (2012).
- [8] "Spacer grid for reducing bowing in a nuclear fuel assembly," United States Patent 4325786 (1982).
- [9] Skinner, G. B. and Johnston, H. L., "Thermal expansion of zirconium between 298 and 1600 K," Tech. Rep. TR 280-9, Cryogenic Laboratory, Department of Chemistry, The Ohio State University, Ohio (1953), <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0004340>.
- [10] "Wikipedia, uranium," <http://en.wikipedia.org/wiki/Uranium> (2012).
- [11] "Table of nuclides," Korea Atomic Energy Research Institute, <http://atom.kaeri.re.kr/> (2012).
- [12] "Wikipedia, properties of water," http://en.wikipedia.org/wiki/Properties_of_water (2012).
- [13] "Regulations for the safe transport of radioactive material," IAEA Safety Standards TS-R-1, International Atomic Energy Agency, Vienna (2009), http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1384_web.pdf.
- [14] "PSG2/Serpent," Serpent website, <http://montecarlo.vtt.fi> (2012).

A Nominaalitapausten syöttötiedostot

A.1 MCNP:n syöttötiedosto

```

VVER assembly
C   TVEL (4%) assembly (no profiling)
C   Pitch 22.5 CM (pool lattice)
C   nominal dimensions
C   Reflecting boundaries => infinite lattice
C   burnup = 0 MWd/kgU
C   Written by Karin Rantamaki, 25.11.2009
C   -----
C   Upper and lower hardware modelled inside shroud tube filled by water
C   Numbering revised
C   Added code words for KRiTu package
C     - CLADENS  cladding density
C     - SHRODENS shroud tube density
C     - CRAD     radius of pellet central hole
C     - PRAD     pellet radius
C     - AGAP     air gap thickness
C     - CWALL    cladding thickness
C     - FUEBOT   z-coordinate of start of fuel
C     - IRAD     inner radius of instrumentation tube
C     - IWALL    wall thickness of instrumentation tube
C     - SRAD     inner radius of shroud tube
C     - SWALL    wall thickness of shroud tube
C     - RPITCH   rod pitch in assembly
C
C   A lattice row added to each side of assembly lattice to enable
C   reduced rod pitch in the assembly
C   KMR 12.5.2011
C   -----
C
C   10      20      30      40      50      60      70      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
C   === CELLS ===
C   --- Fuel bundle ---
C     Central tube
C     1 1001 -0.9591   -1      u=4 imp:n=1 $  water in central tube
C     2 1101 -6.55     +1  -2  u=4 imp:n=1 $  central tube
C     3 1001 -0.9591   +2      u=4 imp:n=1 $  water outside central tube
C
C     Fuel pin
C     11 0             -11      u=1 imp:n=1 $  air filled central hole
C     12 10001 -10.4    +11 -12  u=1 imp:n=1 $  fuel
C     13 0             +12 -13  u=1 imp:n=1 $  air gap
C     14 1101 -6.55     +13 -14  u=1 imp:n=1 $  cladding
C     15 1001 -0.9591   +14      u=1 imp:n=1 $  water outside pin
C
C   Fuel lattice
C 100 1001 -0.9591   -15  u=8  lat=2 imp:n=1 fill=-7:7 -7:7 0:0
C 100 1001 -0.9591   -15  u=8  lat=2 imp:n=1 fill=-8:8 -8:8 0:0
C
C     8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
C     8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
C     8 8 8 8 8 8 8 8 1 1 1 1 1 1 1 8 8
C     8 8 8 8 8 8 8 8 1 1 1 1 1 1 1 8 8
C     8 8 8 8 8 8 1 1 1 1 1 1 1 1 1 8 8

```



```

      8 8 8 8 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 8 8
      8 8 8 8 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 8 8
      8 8 8 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 8 8
      8 8 1 1 1 1 1 1 1 4 1 1 1 1 1 1 1 8 8
      8 8 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 8 8 8
      8 8 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 8 8 8 8
      8 8 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 8 8 8 8 8 8
      8 8 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 8 8 8 8 8 8 8
      8 8 1 1 1 1 1 1 1 1 1 8 8 8 8 8 8 8 8
      8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
      8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
C Assembly with shroud tube (u=11)
201 1102 -6.57 +100 -101 u=11 imp:n=1 $ virtauskanava
211 1001 -0.9591 -100 904 u=11 imp:n=1 $ nipun yläpää
212 1001 -0.9591 -100 -903 u=11 imp:n=1 $ nipun alapää
221 0 -100 903 -904 u=11 imp:n=1 fill=8 $ pa-nippu
291 1001 -0.9591 +101 u=11 imp:n=1 $ moderator water outside shroud tube
C
C assembly surrounded by water
C
321 1001 -0.9591 -102 901 -905 imp:n=1 fill=11
C
401 1001 -0.9591 -211 991 -901 imp:n=1 $ water below assembly
402 1001 -0.9591 -211 +102 901 -905 imp:n=1 $ water around the assembly
403 1001 -0.9591 -211 905 -992 imp:n=1 $ water above assembly
C
C --- The *fearsome* OUTER WORLD, where no particle dares obtrude ---
9999 0 +211:-991:992 imp:n=0
C
C === SURFACES (empty line before this) ===
C --- Surfaces for fuel bundle ---
C central tube
1 cz 0.45 $ inner radius
2 cz 0.515 $ outer radius
C fuel pin
11 cz 0.075 $ central hole
12 cz 0.38 $ fuel region
13 cz 0.3875 $ clad inner radius
14 cz 0.4525 $ clad outer radius
15 rhp 0 0 -10.02 0 0 262.04 0.61 0 0 $ pin cell
C shroud tube
100 rhp 0 0 -50.03 0 0 340.06 0 7.06 0 $ inner surface
101 rhp 0 0 -50.04 0 0 340.08 0 7.21 0 $ outer surface
102 rhp 0 0 -50.01 0 0 340.02 0 11.25 0 $ bundle cell
C
C Water container
C 211 rhp 0 0 -100.01 0 0 390.01 0 27.238 0 $ 20cm water
*211 rhp 0 0 -100.01 0 0 395.01 0 11.251 0 $ 0cm extra water
C
C --- Axial boundaries (origo at bottom of fuel region)
C Fuel region
901 pz -47.3 $ bottom of assembly
903 pz 0 $ start of fuel
904 pz 242 $ end of fuel region
905 pz 272.2 $ top of assembly
C
991 pz -67.3 $ bottom of model (end of world)
992 pz 292.2 $ top end of model (end of world)

```

```
C   *** BEGIN DATA BLOCK (empty line before this) ***
C   === MATERIALS ===
C   === Water
m1001  1001 0.66667
        8016 0.33333
mt1001  lwtr.10t
C   === Cladding
m1101  40000 -0.99
        41093 -0.01
C       72000 -0.0001 $ Hf added to Zr
C   === Shroud tube
m1102  40000 -0.975
        41093 -0.025
C       72000 -0.0001 $ Hf added to Zr
C   === fuel
C   === burnup  0.00 MWd/kgU
C   === enrichment of fuel: 4.00 % ===
m10001  8016 -0.118517
        92234 -0.000300
        92235 -0.035259
        92238 -0.845924
C   === Temperature ===
tmp 2.53e-08 18R
C   === SOURCE ===
kcode 100000 1.0 100 600
sdef  x=d1 y=d2 z=d3 erg=d4
si1   -5.0  5.0
sp1    0.   1.
si2   -5.0  5.0
sp2    0.   1.
si3    -0  242
sp3    0.   1.
sp4   -3
```

A.2 Serpentin syöttötiedosto

```
% --- VVER-440 Assembly. Parametrstudyn nominaalinippu ---
```

```
set title "VVER-440 nominaali"
```

```
% --- Fuel pin with central hole:
```

```
pin 1
void  0.07500
fuel  0.38000
void  0.38750
clad  0.45250
water
```

```
% --- Central tube:
```

```
pin 2
water 0.45000
clad  0.51500
water
```

```
% --- Empty lattice position:

pin 3
water

% --- Lattice (type = 2, pin pitch = 1.23 cm):

lat 10 2 0.0 0.0 15 15 1.22
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 3
3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 3
3 3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3
3 3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3
3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3
3 3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3
3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3
3 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3
3 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 3
3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3
3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3
3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3
3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3
3 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3

% --- Surfaces (assembly pitch = 14.7 cm):

surf 1 hexyc 0.0 0.0 7.060 % Shroud tube inner radius
surf 2 hexyc 0.0 0.0 7.210 % Shroud tube outer radius
surf 3 hexyc 0.0 0.0 11.250 % Outer boundary
surf 4 pz -121.0 % Lower limit of bundle
surf 5 pz 121.0 % Upper limit of bundle
surf 6 pz -188.3 % Lower limit of water below bundle
surf 7 pz 171.2 % Upper limit of water above bundle

% --- Cells:

cell 1 0 fill 10 -1 4 -5 % Pin lattice
cell 4 0 tube 1 -2 4 -5 % Shroud tube
cell 5 0 water 2 -3 4 -5 % Water in channel
cell 6 0 water -3 5 -7 % Water above bundle
cell 7 0 water -3 -4 6 % Water below bundle

cell 97 0 outside -6
cell 98 0 outside 7
cell 99 0 outside 3 6 -7 % Outside world

% --- UO2 fuel enriched to 3.6 wt-% U-235:

mat fuel -10.40000
92234.03c -0.000300
92235.03c -0.035259
92238.03c -0.845924
8016.03c -0.118517

% --- Zr-Nb cladding and shroud tube:

mat clad -6.55000
40000.03c -0.98990
```

```
41093.03c  -0.01000
72000.03c  -0.00010
```

```
mat tube   -6.57000
40000.03c  -0.97490
41093.03c  -0.02500
72000.03c  -0.00010
```

```
% --- Water:
```

```
mat water  -0.95910  moder lwtr 1001
 1001.03c   2.0
 8016.03c   1.0
```

```
% --- Thermal scattering data for light water:
```

```
therm lwtr lwj3.00t
```

```
% --- Cross section library file path:
```

```
set acelib "/home/tpvtuomas/xsdata/sss_jeff311u.xsdata"
```

```
% --- Periodic boundary condition:
```

```
set bc 3
```

```
% --- Neutron population and criticality cycles:
```

```
set pop 50000 5000 100
```

```
% --- Geometry and mesh plots:
```

```
%plot 3 500 1500
```

```
%plot 2 500 1500
```

```
%plot 1 1500 1500
```

```
%mesh 3 500 500
```