

Tanja Laitinen

**SUUREN PAINEVESIREAKTORIN
JÄÄHDYTTEENMENETYSONNETTOMUUDEN
MALLINTAMINEN SYSTEEMIKOODILLA**

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Joulukuu 2020

TIIVISTELMÄ

Tanja Laitinen: Suuren painevesireaktorin jäähdytteenmenetysonnettomuuden mallintaminen systeemikoodilla
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikka
Joulukuu 2020

Ydinvoimalaitoksien häiriötön sähköntuotanto vaatii huomion kiinnittämistä ydinturvallisuuteen. Tästä syystä varautuminen erilaisiin häiriö- ja onnettomuustilanteisiin ydinvoimalaitoksilla on tärkeä osa ydinturvallisuussuunnittelua. Häiriö- ja onnettomuustyyppinä on monenlaisia ja niihin voi liittyä hyvin monimutkaisia ilmiöitä niin reaktorifysiikan kuin termohydrauliikan suhteen. Erilaisten onnettomuuksien ilmiöiden ymmärtäminen ja laskentamallien kehittäminen ovat tärkeä osa ydinturvallisuutta.

Tässä työssä tarkastellaan jäähdytteenmenetysonnettomuutta. Painevesireaktorin tapauksessa tämä tarkoittaa sitä, että primääripiiristä vuotaa jäähdytettä suojarakennukseen. Tällöin paine primääripiirissä laskee ja jäähdyte höyrystyy tämän seurauksena. Reaktorissa höyry heikentää lämmönsiirtoa polttoaineesta jäähdytteeseen, jolloin polttoaineen jäähdytys vaarantuu. Lämpötilan noustessa polttoaineessa ja sen suojakuoressa liian korkeaksi voi seurauksena olla polttoainevaurio. Ydinvoimalaitoksissa tällaiseen onnettomuuteen on varauduttu hätäjäähdytysjärjestelmillä, sillä muuten jäähdytteenmenetysonnettomuus voisi johtaa vakavaan reaktorionnettomuuteen.

Jäähdytteenmenetysonnettomuutta mallinnetaan tässä työssä käyttämällä systeemikoodia Apros. Työn tarkoituksena on jatkaa Olkiluoto 3 -laitosyksiköstä tehdyn Apros-mallin validointia. Työssä tarkasteltava malli on tehty erityisesti jäähdytteenmenetysonnettomuuden mallinnusta varten. Mallinnettaviksi onnettomuustapauksiksi on valittu primääriputkilinjan kaksipäinen giljotiinikatko, paineistimen yhdyslinjan katko sekä paineistimen varoventtiiliin ja sekundääripiiriin höyrylinjojen ulospuhallusventtiilien yhtäaikainen avautuminen. Viimeisessä tapauksessa lasketaan myös pelkän paineistimen varoventtiiliin avautuminen, jota voidaan käyttää varsinaisen analyysin vertailukohtana. Ensimmäisen tapauksen avulla tarkastellaan laskennan herkkyyttä numeeriselle vaihtelulle toistamalla sama simulointi useamman kerran. Toista tapausta vertaillaan laitostoimittajan analyysiin ja kolmatta kokeellisiin tuloksiin.

Suurissa vuototilanteissa Apros mallinsi erittäin hyvin onnettomuuden ilmiöitä. Tulokset vastasivat hyvin laitostoimittajan analyysien tuloksia. Toisessa laskentatapauksessa suojakuoren maksimilämpötila jäi selkeästi laitostoimittajan analyysin tulosta alhaisemmaksi, joka todennäköisesti johtui erilaisesta kriittisen lämpövuon korrelaatiosta. Kolmas laskentatapaus poikkesi jonkin verran kokeellisista tuloksista todennäköisesti koelaitteiston ja koejärjestelyn erojen vuoksi, mutta samoja ilmiöitä oli mahdollista huomata molemmissa tuloksissa. Ensimmäinen laskentatapaus osoitti onnettomuustyyppien herkkyyden alkutilan pienille vaihteluille, mikä viittaa siihen, että joissakin tapauksissa laskenta on toistettava useita kertoja konservatiivisen tuloksen saamiseksi. Työn aikana mallista korjattiin joitakin virheitä ja siihen tehtiin parannuksia sekä tunnistettiin laajempia kehityskohteita. Kriittisen lämpövuon korrelaatio sekä pienemmät vuototilanteet kaipaavat lisätarkastelua. Mallista olisi lisäksi syytä korjata joitakin käytettävyyteen vaikuttavia kohtia.

Avainsanat: ydinturvallisuus, jäähdytteenmenetysonnettomuus, systeemikoodi, Apros

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Tanja Laitinen: Modelling a loss-of-coolant accident in a large pressurized water reactor using system code
Master of Science thesis
Tampere University
Environmental and Energy Engineering
December 2020

To ensure smooth generation of electricity in nuclear power plants it requires paying attention to nuclear safety. Because of this an important part of nuclear safety design is to be prepared for different operational occurrences and accidents in nuclear power plants. There are many different types of operational occurrences and accidents, and these might be associated with very complex phenomena in terms of reactor physics as well as thermal hydraulics. For nuclear safety it is important to understand phenomena in different accidents and to be able to use computational models to analyse these accidents.

In this thesis loss-of-coolant accident is examined. In pressurized water reactor this means that the coolant leaks from the primary circuit into the containment. This leads to the depressurization of the primary circuit and the coolant starts to evaporate. In the reactor steam degrades the heat transfer from the fuel to the coolant causing endangerment of cooling of the fuel. Nuclear power plants are prepared for this type of accident with emergency core cooling systems since without these a loss-of-coolant accident could lead to a severe reactor accident.

A loss-of-coolant accident in this thesis is modeled using system code Apros. The purpose of this thesis is to continue the validation of Apros model of Olkiluoto 3 unit. The model examined in this thesis is made specifically for modelling a loss-of-coolant accident. The accidents chosen to be modelled are double ended large break of the main coolant line, double ended break of the pressurizer surge line and simultaneous opening of the pressurizer safety valve and the main steam relief valves. Also in the last case only opening of the pressurizer safety valve is examined which can be used as a comparison to the main case. Sensitivity to numerical changes are examined with the first case by repeating the simulation multiple times. The second case is compared to the analysis of the contractor and the third case to test results.

In large leaks Apros was great at modelling the phenomena of the accident. The results were very similar with the analysis results of the contractor. In the second modelling case the maximum temperature of the cladding was clearly lower than in the analysis of the contractor which was likely due to a different correlation for the critical heat flux. The third modelling case differed somewhat from the test results likely because of differences in the test facility and in the test itself but the same phenomena could be seen in both results. The first modelling case showed that this type of accident is sensitive to minor changes in the initial state which means that in some situations the case to be modelled must be simulated multiple times to get conservative results. During this thesis some errors were corrected in the model and improvements were made to it. More extensive areas for development were also identified. The correlation for the critical heat flux as well as accidents cases with smaller leaks need more examination. Some modifications that affect the usability of the model should also be fixed.

Keywords: nuclear safety, loss-of-coolant accident, system code, Apros

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Olkiluodossa Teollisuuden Voima Oyj:n ydinturvallisuussuunnittelun yksikölle. Tein tämän diplomityön muuan pandemian myllätessä maailmaa, joten tämä työ on ollut erittäin tervetullut valonpilkahdus muutoin hyvin synkän vuoden aikana. On ollut todella mielenkiintoista päästä seuraamaan OL3-projektin etenemistä lähietäisyydeltä ja olen oppinut ydinturvallisuudesta paljon enemmän kuin olisin osannut kuvitella.

Haluan kiittää kaikkia, jotka ovat osansa tehneet tämän työn valmistumisessa. Ensimmäisenä kiitän työni ohjaajaa Mikko Lemistä erittäin hyvästä ohjauksesta. Opetit paljon Aproxesta ja autoit hiomaan työni sisältöä paremmaksi samalla kuitenkin antaen vapaat kädet ja kannustaen ajattelemaan sekä oivaltamaan itse. Haluan kiittää myös Fortumilta Harri Kontiota hyvistä vastauksista kysymyksiini ja avustamisesta ongelmakohtien ratkaisemisessa sekä Atte Kattaista mallinnukseen liittyvistä neuvoista. Haluan kiittää LUTin Vesa Riikosta ja Virpi Kouhiaa vastauksista kysymyksiini liittyen PWR PACTEL -kokeisiin. Näistä oli paljon apua työhöni sekä sisällön että Aproxella mallintamisen suhteen. Kiitän myös esimiestäni Aapo Taavitsaista työnteon tukemisesta ja kaikista kannustavista kommentteista.

Kiitokset ansaitsee Tampereen yliopiston puolelta ohjaajani yliopistonlehtori Henrik Tolvanen. Toit työhöni hyvin erilaista näkökulmaa ja autoit pitämään työn punaisen langan käsissäni. Kiitos myös ehdottomasti parhaista kursseista koko opiskeluni aikana. Luento- ja innostivat opiskelemaan energiatekniikan alaa ja on ilo nähdä, että opetusta kehitetään jatkuvasti parempaan suuntaan.

Opiskeluvuodet ovat olleet ehdottomasti parasta aikaa ja tästä kiitos kuuluu Ympäristöteekkarikillalle ja Exergialle. Hallitushommissa oli oikein hauskaa ja kiltahengailut, energiateekkaripäivät sekä muut kinkerit tekivät opiskeluajasta ikimuistoista. Erityisesti haluan kiittää kuitenkin vuosikurssini kaveriporukkaa hauskanpidosta, ystävydestä ja vertaistuesta niin diplomityöni tekemisen kuin koko opiskeluni aikana. Jatketaan mökkeilyä, vaikka valmistummekin. Lopuksi haluan kiittää rakasta Pekkaa loputtomasta tuesta ja kannustuksesta. Kiitos, että uskoit minuun silloinkin, kun en itse osannut.

Eurajoella, 4. joulukuuta 2020

Tanja Laitinen

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto	1
2	Jäähdytteenmenetyssonnettomuus ja siihen varautuminen	3
2.1	Onnettomuustyyppin historiaa	3
2.1.1	Three Mile Island 2 -laitosyksikön onnettomuus	5
2.1.2	Onnettomuuden vaikutukset ydinturvallisuuteen	7
2.1.3	Muita tapahtuneita vuoto- ja putkikatkoilanteita	9
2.2	Viranomaisvaatimukset turvallisuusjärjestelmille ja -analyysituloksille	10
2.3	Turvallisuusjärjestelmät jäähdytteenmenetyssonnettomuuden varalle	13
3	Jäähdytteenmenetyssonnettomuuden vaiheet ja tutkimus	16
3.1	Polttoaineen ja jäähdytteen lämmönsiirto	16
3.2	Onnettomuuden vaiheet	18
3.2.1	Ulospuhallus ja kriittinen virtaus	18
3.2.2	Uudelleentäytyminen, uudelleentulvitus ja pitkäaikainen jäähdytys	20
3.3	Kokeellinen tutkimus	22
3.3.1	Erillisilmiökokeet ja kokonaiskokeet	23
3.3.2	Tutkimus Suomessa	24
4	Jäähdytteenmenetyssonnettomuuden mallintaminen	26
4.1	Ydinvoimalaitoksen mallinnus systeemikoodeilla	26
4.2	Mallinnus Apros-ohjelmistolla	28
4.2.1	Olkiluoto 3 -laitosyksikön Apros-malli	29
4.2.2	Laitosmallin kaksifaasimallinnus	31
4.3	Onnettomuuden ilmiöiden mallintaminen	32
4.3.1	Kriittinen virtaus	32
4.3.2	CCFL-ilmiö	33
4.3.3	Lämmönsiirto	35
5	Tutkimusmenetelmät ja -aineisto	37
5.1	Valitut laskentatapaukset	38
5.2	Alkuoletukset	41
5.2.1	Laitosmallin alkutila	41
5.2.2	Toimintojen käynnistyminen ja käytössä olevat järjestelmät	43
5.2.3	Vikaoletukset	44
5.3	Onnettomuusluokkien hyväksymiskriteerit laskentatapauksille	46
5.4	Laskentamenetelmät	46
5.4.1	Tapaus 1: 2A-LOCA	47

5.4.2	Tapaus 2: Paineistimen yhdyslinjan katko	48
5.4.3	Tapaus 3: PSV:n avautuminen sekä PSV:n ja MSRT:n yhtäaikainen avautuminen	50
6	Tulokset ja johtopäätökset	53
6.1	Tapaus 1: 2A-LOCA	53
6.2	Tapaus 2: Paineistimen yhdyslinjan katko	56
6.3	Tapaus 3: PSV:n avautuminen sekä PSV:n ja MSRT:n yhtäaikainen avautuminen	63
6.4	Johtopäätökset ja kehitysehdotukset	71
7	Yhteenveto	74
	Lähteet	76
	Liite A Laskentatapauksissa käytetyt aksiaalitehojakaumat	82
	Liite B Laskentatapausten alkutiloihin tehdyt muutokset	89
	Liite C Laskentatapausten simulointitiedostot	99
	Liite D Laskentatapauksen 1 tulokuvia (perusmalliversio)	115
	Liite E Laskentatapauksen 1 tulokuvia (malliversio ohjausputkilla)	124

KUVALUETTELO

2.1	Yksinkertaistetut primääripiirin pääkiertopiiri, reaktoripainesäiliö ja virtauksen reitti sekä kiehunnan muuttuminen polttoainesauvojen seinämällä. Numeroidut komponentit ovat 1: reaktoripainesäiliö, 2: paineistin, 3: höyrystin, 4: pääkiertopumppu, 5: kylmä haara, 6: alasmenotila, 7: reaktoripainesäiliön pohja/alatila, 8: alatukilevy/sydämen alareuna, 9: sydämen ylätukilevy, 10: polttoaine-elementti, 11: ylempi tukilevy, 12: reaktoripainesäiliön ylätila ja 13: kuuma haara. Muokattu lähteistä [33, s. 46][67, s. 26][72, s. 79–81].	4
3.1	Kiehumisen vaiheet esitetty logaritmisena lämpövoiman ja suojakuoren lämpötilan funktiona. Muokattu lähteestä [40, s. 442].	17
4.1	Apros-mallin rakenne eri tasoilla, muokattu lähteestä [3].	28
4.2	Reaktorisydämen polttoaine-elementtien jako yhdeksään sisäkkäiseen kanavaan monikanavamallissa [36, s. 4].	30
5.1	Tapahtumasarja 2A-LOCassa (tapaus 1) [6, s. 4–5, 93].	39
5.2	Tapahtumasarja paineistimen yhdyslinjan katkossa (tapaus 2) [10, s. 1–3, 44].	39
5.3	Tapahtumasarja paineistimen varoventtiilin avautumisessa (tapaus 3) [22, s. 1–2].	40
6.1	Suojakuoren maksimilämpötila kuumassa sauvassa, perusmalliversio. . .	54
6.2	Suojakuoren maksimilämpötila kuumassa sauvassa, malliversiossa ohjausputket.	55
6.3	Primääripiirin ja paineistimen paine, huomaa eri aika-akselit. Laitostoimittajan tulokset lähteestä [10, s. 69].	57
6.4	Vuotovirtaus yhteensä paineistimesta ja primääripiiristä, katkoviivoilla merkitty MHSI-syötön, paineakkusyötön ja LHSI-syötön alkaminen Aproksen mukaan, laitostoimittajan tulokset lähteestä [10, s. 70].	57
6.5	Hätäjäähdytysvirtaus yhteensä, laitostoimittajan tulokset lähteestä [10, s. 70].	58
6.6	Kokonaisvuotovirtaus sekä höyryvirtaus kuuman haaran puolelta, katkoviivalla merkitty pääkiertopumppujen sähkönmenetyksen ajankohta Aproksen mukaan, laitostoimittajan tulokset lähteestä [10, s. 70].	59
6.7	Sekundääripiirin paine, laitostoimittajan tulokset lähteestä [10, s. 69]. . . .	60

6.8	Suojakuoren maksimilämpötila kuumassa sauvassa, kuvaan merkitty molemmissa tapauksissa lämmönsiirtokriisin alkamishetki, laitostoimittajan tulokset lähteestä [10, s. 71].	61
6.9	Suojakuoren maksimilämpötila kuumassa sauvassa eri vika- ja ennakko-huoltoyhdistelmillä.	61
6.10	Suojakuoren maksimilämpötila kuumassa sauvassa eri malliversioilla. . .	62
6.11	Primääri- ja sekundääripaine Aproksella laskettuna ja koetuloksissa. Koetuloksissa paineet on skaalattu koelaitteiston mukaisesti [59]. Katkoviivalla on merkitty MHSI-syötön alkamisen ajankohta Aproksessa ja koetuloksissa. Koetulokset lähteestä [59].	64
6.12	Kokonaisuotvirtaus Aproksella laskettuna ja koetuloksissa. Koetuloksissa vuotovirtauksen poikkipinta-ala on skaalattu koelaitteiston mukaisesti [59]. Koetulokset lähteestä [59].	65
6.13	Paineistimen pinnankorkeus Aproksella laskettuna ja koetuloksissa. Koetuloksissa pinnankorkeus on määrätty alkuperäisen paineistimen korkeuden mukaan [59]. Katkoviivalla on merkitty osittaisen jäähtymisen päättymisen ajankohta Aproksessa ja koetuloksissa. Koetulokset lähteestä [59].	66
6.14	Paineistimen ja sekundääripiirin paine, laitostoimittajan tulokset lähteestä [22, s. 19, 21].	67
6.15	Höyry- ja vesivuotovirtaus, laitostoimittajan tulokset lähteestä [22, s. 23]. .	68
6.16	Suojakuoren maksimilämpötila kuumassa sauvassa, laitostoimittajan tulokset lähteestä [22, s. 18].	68
6.17	Primääri- ja sekundääripaine Aproksella laskettuna ja koetuloksissa. Koetuloksissa paineet on skaalattu koelaitteiston mukaisesti [59]. Katkoviivalla on merkitty MHSI-syötön alkamisen ajankohta Aproksessa ja koetuloksissa. Koetulokset lähteestä [59].	69
6.18	Kokonaisuotvirtaus Aproksen laskemana ja koetuloksissa. Koetuloksissa vuotovirtauksen poikkipinta-ala on skaalattu koelaitteiston mukaisesti [59]. Koetulokset lähteestä [59].	70
6.19	Paineistimen pinnankorkeus Aproksen laskemana ja koetuloksissa. Koetuloksissa pinnankorkeus on määrätty alkuperäisen paineistimen korkeuden mukaan [59]. Koetulokset lähteestä [59].	71
A.1	Tapauksen 1 keskiarvoisen elementin aksiaalitehojakauma kanavissa 2–9 sekä kuuman elementin ja kuuman sauvan aksiaalitehojakauma [36, s. 8–10].	82
A.2	Tapauksen 2 ja 3 keskiarvoisen elementin aksiaalitehojakauma kanavissa 2–9 sekä kuuman elementin ja kuuman sauvan aksiaalitehojakauma [10, s. 8, 47].	83
D.1	Massavirta kanavan 1 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan	115

D.2	Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 1	115
D.3	Massavirta kanavan 2 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan	116
D.4	Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 2	116
D.5	Massavirta kanavan 3 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan	117
D.6	Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 3	117
D.7	Massavirta kanavan 4 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan	118
D.8	Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 4	118
D.9	Massavirta kanavan 5 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan	119
D.10	Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 5	119
D.11	Massavirta kanavan 6 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan	120
D.12	Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 6	120
D.13	Massavirta kanavan 7 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan	121
D.14	Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 7	121
D.15	Massavirta kanavan 8 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan	122
D.16	Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 8	122
D.17	Massavirta kanavan 9 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan	123
D.18	Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 9	123
E.1	Massavirta kanavan 1 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan	124
E.2	Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 1	124
E.3	Massavirta kanavan 2 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan	125
E.4	Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 2	125
E.5	Massavirta kanavan 3 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan	126
E.6	Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 3	126
E.7	Massavirta kanavan 4 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan	127
E.8	Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 4	127
E.9	Massavirta kanavan 5 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan	128
E.10	Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 5	128
E.11	Massavirta kanavan 6 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan	129
E.12	Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 6	129
E.13	Massavirta kanavan 7 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan	130
E.14	Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 7	130
E.15	Massavirta kanavan 8 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan	131
E.16	Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 8	131
E.17	Massavirta kanavan 9 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan	132
E.18	Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 9	132

TAULUKKOLUETTELO

2.1	Tapahtumat TMI-2-laitosyksikön onnettomuudessa turbiinin pikasulusta alkaen. Muokattu lähteistä [18, s. 1–24][30, s. 222].	5
2.2	Joitakin tuloksille asetettuja hyväksymiskriteerejä YVL-ohjeista tapahtumaluokan mukaan [74, s. 9–11][75, s. 16–17][77, s. 6–7].	12
4.1	CCFL-korrelaation vakiot laitosmallissa [39, s. 30–31].	34
5.1	Laskentatapaukset, vertailukohteet ja tarkasteltavat tulokset.	38
5.2	Laskennassa käytettäviä alkutilan oletuksia. [6, s. 89–90][10, s. 30][36, s. 5][59]	42
5.3	Laskennassa käytettävien kanavien ja kuuman sauvan lämpötehot (MW) sadan prosentin teholla.	43
5.4	Laskennassa käytettäviä toimintojen käynnistymisten oletuksia. [6, s. 4–5, 93] [10, s. 9–11] [59][60, s. 9]	43
5.5	Käytettävissä olevien turvallisuusjärjestelmien määrä ja oletus ulkoisen sähköverkon menetyksestä. [6, s. 3, 56] [10, s. 7, 33] [59][60, s. 4–5] . . .	45
6.1	Tapahtumasarja toisessa laskentatapauksessa alkaen alkutapahtumasta, vertailu laitostoimittajan analyysiin [10, s. 44].	56
6.2	Tapahtumasarja kolmannessa laskentatapauksessa (vain PSV) alkaen alkutapahtumasta, vertailu laitostoimittajan analyysiin ja koetuloksiin [22, s. 14][59].	63
6.3	Tapahtumasarja kolmannessa laskentatapauksessa (PSV + MSRT) alkaen alkutapahtumasta, vertailu koetuloksiin [59].	69
A.1	Tapauksen 1 keskiarvoisen elementin aksiaalitehojakauma kanavissa 2–9 [36, s. 10].	84
A.2	Tapauksen 1 kuuman elementin aksiaalitehojakauma [36, s. 9].	85
A.3	Tapauksen 1 kuuman sauvan aksiaalitehojakauma [36, s. 8].	86
A.4	Tapauksen 2 ja 3 keskiarvoisen elementin aksiaalitehojakauma kanavissa 2–9 [10, s. 8, 47].	87
A.5	Tapauksen 2 ja 3 kuuman elementin ja sauvan aksiaalitehojakauma[10, s. 8, 47].	88

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Lyhenteet

2A-LOCA	Double Ended Large Break of the Main Coolant Line, primääriputkilinjan kaksipäinen giljotiinikatko
ATWS	Anticipated Transient Without Scram, käyttöhäiriö ilman pikasulkua
BWR	Boiling Water Reactor, kiehutusvesireaktori
CCFL	Countercurrent Flow Limitation, vastavirtauksen rajoitus
CHR	Critical Heat Flux, kriittinen lämpövuoto
DBC	Design Basis Condition, suunnitteluperustetilanne
DEC	Design Extension Condition, oletetun onnettomuuden laajennus
DNBR	Departure from Nucleate Boiling Ratio, lämmönsiirtokriisin marginaali
EFWS	Emergency Feedwater System, hätäsyöttövesijärjestelmä
EPR	European Pressurized water Reactor, eurooppalainen painevesireaktori
IAEA	International Atomic Energy Agency, Kansainvälinen atomienergiajärjestö
INES	International Nuclear Event Scale, kansainvälinen ydinlaitostapahtumien vakavuusasteikko
IRS	Incident Reporting System, käyttökokemusten jakamiseen tarkoitettu järjestelmä
LBB	Leak Before Break, vuoto ennen murtumaa
LHSI	Low Head Safety Injection, matalapaineinen hätäjähdytysjärjestelmä
LOCA	Loss-of-Coolant Accident, jäähdytteenmenetysonnettomuus
LOOP	Loss Of Offsite Power, ulkoisen sähköverkon menetys
MHSI	Medium Head Safety Injection, keskipaineinen hätäjähdytysjärjestelmä
MSRT	Main Steam Relief Train, sekundääripiirin höyrylinjojen ulospuhallusjärjestelmä
NEA	Nuclear Energy Agency, OECD:n ydinenergiajärjestö

OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development, Taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestö
PACTEL	Parallel Channel Test Loop, VVER-tyyppinen koelaitos
PKL	Primärkreislauf, PWR-tyyppinen koelaitos
PRA	Probabilistic Risk Assessment, todennäköisyysperusteinen riskianalyysi
PSV	Pressurizer Safety Valve, paineistimen varoventtiili
PWR	Pressurized Water Reactor, painevesireaktori
RCP	Reactor Coolant Pump, reaktorin pääkiertopumppu
RIA	Reactivity Initiated Accident, reaktiivisuusonnettomuus
SAHARA	Safety As High As Reasonable Achievable, turvallisuusperiaate
STUK	Säteilyturvakeskus
TVO	Teollisuuden Voima Oyj
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
VVER	Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor, neuvostoliittolainen/venäläinen painevesireaktori
WENRA	Western European Nuclear Regulators Association, Länsi-Euroopan ydinturvallisuusviranomaisten järjestö

Kreikkalaiset aakkoset

α	tilavuusosuus	-
Γ	massan siirtymisnopeus	kg/(s·m ³)
λ	lämmönjohtavuus	W/(m·K)
μ	dynaaminen viskositeetti	Pa·s
ρ	tiheys	kg/m ³
σ	pintajännitys	N/m

Roomalaiset aakkoset

C	korrelaatiokertoimen	-
D_h	hydraulinen halkaisija	m
F	vastusvoima	N
G	massavuo	kg/(m ² ·s)

g	putoamiskiihtyvyys	m/s^2
H	lämmönsiirtokerroin	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
h	entalpia	kJ/kg
h_{fg}	latenttilämpö	kJ/kg
j	näennäisnopeus	m/s
p	paine	Pa
Q'''	lämpötiheys	W/m^3
S	liukusuhte	-
s	entropia	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
T	lämpötila	$\text{K}, ^\circ\text{C}$
t	aika	s
u	virtausnopeus	m/s
v	ominaistilavuus	m^3/kg
x	höyrypitoisuus	-
z	paikkakoordinaatti	m

Dimensiottomat luvut

Gr	Grashofin luku
K	Kutateladzen luku
Nu	Nusseltin luku
Pr	Prandtlin luku

Indeksit

g	kaasufaasi
i	faasien välinen
l	nestefaasi
w	seinän ja faasin välinen

1 JOHDANTO

Ydinvoimasta on tulossa entistä merkittävämpi osa Suomen sähköntuotantoa rakenteilla olevan Olkiluoto 3 -laitosyksikön valmistumisen myötä. Sähkön häiriötön tuotanto vaatii huomion kiinnittämistä erityisesti ydinturvallisuuteen. Ydinvoimalaitoksen turvallisuus suunnittelulla varmistetaan, että ydinreaktorin toiminta on turvallista normaalikäytön, häiriöiden ja mahdollisten onnettomuustilanteiden aikana. Ydinvoimalaitoksissa käsitellään radioaktiivisia aineita, joiden lähettämä ionisoiva säteily on haitallista ympäristölle, eläimille ja ihmisille. Ydinturvallisuuden yksi tärkeimpiä tavoitteita on tästä syystä minimoida radioaktiivisten aineiden pääsy ympäristöön. [26, s. 90]

Suurta jäähdytteenmenetysonnettomuutta pidetään yhtenä vakavimpana onnettomuustyyppinä ydinvoimalaitokselle, minkä takia monet turvallisuusjärjestelmät on mitoitettu tämän perusteella. Onnettomuudessa reaktorin läpi virtaava jäähdyte vuotaa reaktorista pois putkirikon tai venttiilin virheellisen avautumisen seurauksena vaarantaen polttoaineen jäähdytyksen. Three Mile Island 2 -laitosyksikön onnettomuus osoitti, että pienikin jäähdytevuoto voi aiheuttaa vakavan reaktorionnettomuuden, mikäli siihen ei ole varauduttu oikealla tavalla. Onnettomuuden jälkeen tehtiin paljon ydinturvallisuutta parantavia muutoksia, ja nykyiset turvallisuusanalyysit kattavat hyvin laajasti erilaisia häiriö- ja onnettomuustilanteita. [30, s. 228–229][52, s. 172–177]

Ydinvoimalaitoksen onnettomuuskäyttäytymistä tarkastellaan turvallisuusanalyyseissä systeemikoodien avulla. Systeemikoodeilla voidaan mallintaa laajoja järjestelmäkokonaisuuksia ja tarkastella niiden toimintaa onnettomuustilanteen aikana erityisesti termohydraulikan suhteen. [9, s. 641–642] Yksi tällainen koodi on tässä työssä käytettävä Apros, jonka kehitys on alkanut vuonna 1986 Suomessa. Olkiluoto 3 -laitosyksiköstä on rakennettu kolme reaktorimalliltaan erilaista Apros-laitosmallia eri analyysitarpeisiin. Näistä malleista yksi, monikanavamalli, on kehitetty erityisesti mallintamaan jäähdytteenmenetysonnettomuutta. Malli on tällä hetkellä validoitu laitostoimittajan laatimaa suuren jäähdytteenmenetysonnettomuuden analyysiä vastaan [36]. [28][53]

Tässä diplomityössä jatketaan monikanavamallin validointityötä kahdella muulla jäähdytteenmenetysonnettomuudella. Työssä laskettuja tuloksia vertaillaan sekä laitostoimittajan analyysiin että kokeellisiin tuloksiin. Lisäksi suuren jäähdytteenmenetysonnettomuuden avulla tarkastellaan uuden reaktorimallin laskennan herkkyyttä numeeriselle vaihte-

lulle. Työn tavoitteena on vastata seuraaviin kysymyksiin:

1. Mitä voidaan tehdä tarkasteltavan onnettomuuden ehkäisemiseksi ja mitä sen sattuessa?
2. Kuinka onnettomuus etenee ja mitkä ovat sen vaikutukset polttoaineeseen?
3. Millä periaatteilla onnettomuutta voidaan mallintaa?
4. Kuinka hyvin tarkasteltava Apros-malli soveltuu onnettomuuden mallintamiseen ja mitä mallissa olisi vielä kehitettävää?

Työssä on kirjallisuuteen perustuva teoriaosuus ja laskentaosuus, jossa tarkastellaan työhön valittuja onnettomuustilanteita ja niiden mallinnusta. Työssä käydään läpi ensin jäähdytteenmenetysonnettomuuden taustaa ja historiaa erityisesti Three Mile Islandin onnettomuuden kannalta. Tämän jälkeen käydään läpi viranomaisvaatimuksia häiriö- ja onnettomuustilanteille. Luvun lopussa tarkastellaan jäähdytteenmenetysonnettomuuden varalle suunniteltuja turvallisuusjärjestelmiä painevesireaktorilaitoksella pääpainon ollessa Olkiluoto 3 -laitosyksiköllä. Tämä luku vastaa ensimmäiseen tutkimuskysymykseen teoreettisesta näkökulmasta.

Kolmannessa luvussa vastataan toiseen tutkimuskysymykseen perehtymällä jäähdytteenmenetysonnettomuuden ilmiöihin niin polttoaineen kuin jäähdytteen osalta. Lisäksi käydään läpi niin Suomessa kuin muualla maailmalla tehtyä tutkimusta liittyen onnettomuuden ilmiöihin, laskentakoodien kehitykseen ja Olkiluoto 3 -laitosyksikköön. Neljännessä luvussa tarkastellaan jäähdytteenmenetysonnettomuuden mallinnusperiaatteita tärkeimpien ilmiöiden kannalta. Tässä luvussa perehdytään myös yleisesti systeemikoodeihin ja esitellään tässä työssä käytettävä systeemikoodi Apros vastaten kolmanteen tutkimuskysymykseen.

Luvussa viisi kuvataan työhön valitut laskentatapaukset. Näistä esitellään lähtötila, tapahtumakulku ja vikaoletukset ydinvoimalaitoksen turvallisuusanalyysin tapaan. Luvussa kuvataan myös tapausten laskentamenetelmät. Luvussa vastataan toiseen ja kolmanteen tutkimuskysymykseen tämän työn näkökulmasta. Kuudennessa luvussa vastataan viimeiseen tutkimuskysymykseen esittelemällä laskennan tulokset ja tekemällä johtopäätökset tulosten ja teorian perusteella. Viimeisessä luvussa työn sisältö kootaan yhteen.

2 JÄÄHDYTTEENMENETYSONNETTOMUUS JA SIIHEN VARAUTUMINEN

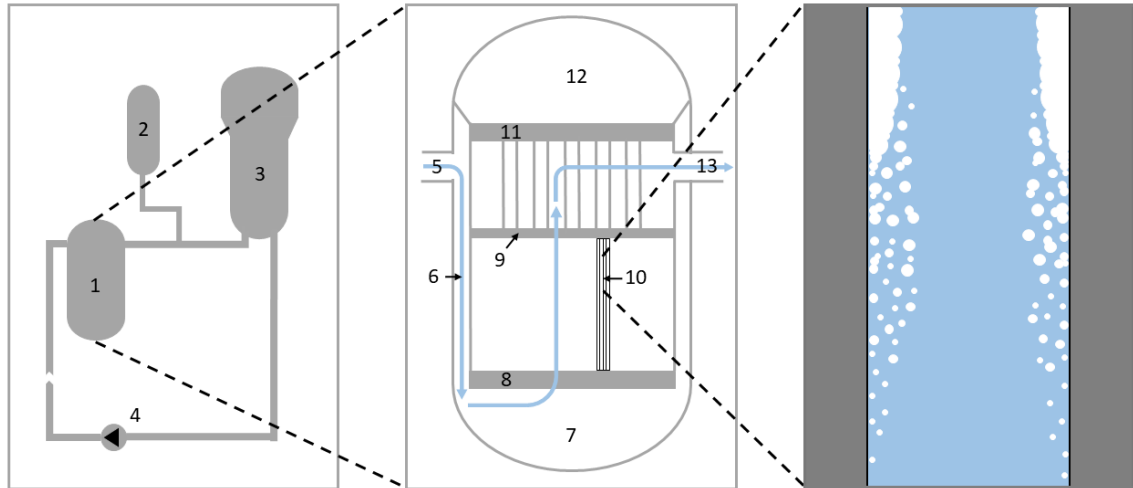
Jäähdytteen tehtävä on siirtää ydinpolttoaineen tuottama lämpö pois reaktorista. Yleisin jäähdyte on vesi, jota käytetään kiehutusvesireaktoreissa (BWR, Boiling Water Reactor) ja painevesireaktoreissa (PWR, Pressurized Water Reactor). BWR-laitoksessa vesi höyrystyy reaktorissa, kun taas PWR-laitoksessa lämpö siirretään höyrystimille, jossa primääripiirin vesi höyrystää sekundääripiirin vettä. Jäähdytteenä voidaan käyttää myös raskasta vettä, kaasua tai sulaa metallia. [15, s. 43–44] Tässä työssä käsitellään vain kevytvesireaktoreita, joten jäähdytteellä viitataan aina tavalliseen veteen.

Ydinvoimalaitoksissa suurin osa radioaktiivisista aineista on polttoaineessa, joten polttoaineen eheyden varmistaminen onnettomuustilanteissa on yksi tärkeimmistä turvallisuustavoitteista [15, s. 55]. Polttoaineen eheys voi pettää, jos lämpötila polttoaineessa nousee liian korkeaksi. Tällainen tilanne voi syntyä, jos lämmönsiirto jäähdytteeseen heikkenee esimerkiksi pääkiertopumpun pysähtyessä ja jäähdytevirtauksen heikentyessä. Toisaalta myös polttoaineen tuottama teho voi kasvaa liian suureksi suhteessa jäähdytykseen esimerkiksi säätösauvan tipahtaessa ulos reaktorista BWR:n tapauksessa tai lentäessä ulos PWR:n reaktorista. [8, s. 20–21][26, s. 91–96]

Jäähdytteenmenetysonnettomuudessa (LOCA, Loss-of-coolant accident) polttoaineen ja jäähdytteen välinen lämmönsiirto heikkenee jäähdytteen vuotaessa PWR:n tapauksessa primääripiiristä suojarakennukseen [8, s. 21–22]. Kuvassa 2.1 on esimerkiksi kuvattu kylmän haaran katkeamisen sijoittuminen primääripiirissä ja jäähdytteen kiehumisen muuttuminen polttoainesauvan pinnalla. Turvallisuussuunnittelulla voidaan minimoida polttoaineen vaurioitumisen riski LOCA-tilanteessa varmistamalla reaktorin sammutus ja polttoaineen jäähdytys erilaisilla turvallisuusjärjestelmillä. [26, s. 95–96]

2.1 Onnettomuustyyppien historiaa

Jäähdytteenmenetysonnettomuuksia on tapahtunut hyvin vähän ydinvoimalaitoksilla ja vain Three Mile Island 2 -laitosyksiköllä (TMI-2) tapahtunut onnettomuus on johtanut vakavaan reaktorionnettomuuteen. On kuitenkin tärkeä tarkastella näitä tapahtuneita onnettomuuksia, jotta voidaan estää niiden tapahtuminen muilla ydinvoimalaitoksilla. Todellisis-



Kuva 2.1. Yksinkertaistetut primääripiirin pääkiertopiiri, reaktoripainesäiliö ja virtauksen reitti sekä kiehumun muuttuminen polttoainesauvojen seinämillä. Numeroidut komponentit ovat 1: reaktoripainesäiliö, 2: paineistin, 3: höyrystin, 4: pääkiertopumppu, 5: kylmä haara, 6: alasmenotila, 7: reaktoripainesäiliön pohja/alatila, 8: alatukilevy/sydämen alareuna, 9: sydämen ylätukilevy, 10: polttoaine-elementti, 11: ylempi tukilevy, 12: reaktoripainesäiliön ylätila ja 13: kuuma haara. Muokattu lähteistä [33, s. 46][67, s. 26][72, s. 79–81].

ta onnettomuustilanteista saadut opit mahdollistavat myös laskentamenetelmien testausten ja tulosten vertailun täydessä mittakaavassa. [30][52, s. 172–182]

Ennen TMI-2 -laitosyksikön onnettomuutta ydinvoimalaitosten turvallisuutta tarkasteltiin odotettavissa olevissa käyttöhäiriöissä ja oletetuissa onnettomuuksissa. Mahdollisia onnettomuustilanteiden alkutapahtumia analysoitiin siten, että otettiin huomioon onnettomuutta pahentavia tilanteita kuten laitevikoja. Tällä tavoin voitiin varmistua riittävästä turvallisuusmarginaaleista kaikissa tilanteissa. Käyttöhäiriöiden ei oletettu aiheuttavan vaaraa reaktorin lämmönpoistolle ja pahimmissa oletetuissa onnettomuuksissa turvallisuusjärjestelmien tuli taata reaktorin jäähtytys. Vakavia onnettomuuksia ei siis tarvinnut analysoida, koska turvallisuusvaatimusten oli tarkoitus pienentää sellaisen riskin olemattoman pieneksi. [62] Jäähdytteenmenetysonnettomuuden kannalta tämä tarkoitti sitä, että pienten vuotojen ei oletettu vaarantavan reaktorin jäähtytystä ja suuressa LOCAssa polttoaineeseen kohdistuisi vain vähän vaurioita, kun turvallisuusjärjestelmät toimisivat suunnitellusti. Three Mile Islandin onnettomuus opetti ydinvoimateollisuudelle, että varautuminen primääripiirin suurimman putken katkeamiseen ei takaa automaattisesti reaktoriturvallisuutta, vaan myös pienempiä vuotoja ja monimutkaisempia tapahtumasarjoja sekä vakavien onnettomuuksien ilmiöitä on syytä tutkia [25, s. 7]. [26, s. 97–100]

2.1.1 Three Mile Island 2 -laitosyksikön onnettomuus

Ainoa vakavaan onnettomuuteen johtanut jäähdytteenmenetysonnettomuus sattui Three Mile Islandin ydinvoimalaitoksella 28.3.1979. Laitoksen molemmat painevesireaktoriyksiköt olivat noin 800 MW sähköteholtaan ja laitosyksikkö 2 kävi 97 prosentin teholla ennen onnettomuuden alkua. [30, s. 221] Kyseisellä laitosyksiköllä tehtiin huoltotöitä lauhdepumpuilla ja töiden yhteydessä tapahtuneiden ongelmien seurauksena puolet lauhdepumpuista pysähtyivät. Koska syöttövesipumput eivät saaneet riittävästi vettä, automaatio sulki nämä pumput ja aiheutti turbiinin pikasulun. [18, s. 1–2] Taulukossa 2.1 on esitelty tapahtumat alkaen turbiinin pikasulusta.

Taulukko 2.1. *Tapahtumat TMI-2-laitosyksikön onnettomuudessa turbiinin pikasulusta alkaen. Muokattu lähteistä [18, s. 1–24][30, s. 222].*

Aika turbiinin pikasulusta	Tapahtuma
3 sekuntia	Paineistimen ulospuhallusventtiili aukeaa (primääripiirin paineen nousu)
8 sekuntia	Reaktorin pikasulku (primääripiirin paineen nousu)
3 minuuttia	Puhallussäiliön paineenalennusventtiili aukeaa -> primääripiirin vettä virtaa suojarakennukseen
5 minuuttia	Operaattorit säätävät korkeapaineisen hätäjäähdytysjärjestelmän virtausta pienemmäksi
15 minuuttia	Puhallussäiliön murtolevy rikkoontuu -> lisää primääripiirin vettä suojarakennukseen
1 tunti 14 minuuttia	Operaattorit pysäyttävät pääkiertopiirin B pääkiertopumput
1 tunti 41 minuuttia	Operaattorit pysäyttävät pääkiertopiirin A pääkiertopumput -> vesi ja höyry erottuvat ja vedenpinta asettuu sydämen yläreunan tasolle
2 tuntia 19 minuuttia	Paineenalennuslinjan eristysventtiili suljetaan -> vuoto primääripiiristä loppuu
2 tuntia 54 minuuttia	Operaattorit käynnistävät pääkiertopiirin B yhden pääkiertopumpun -> sydämen osittainen tulvittuminen
2 tuntia 56 minuuttia	Suojarakennuksessa mitattujen annosnopeuksien havaitaan olevan huomattavan suuria, laitoksella julistetaan laitoshätätila
3 tuntia 23 minuuttia	Laitoksella julistetaan yleishätätila
3 tuntia 44 minuuttia	Osa reaktorin keskelle muodostuneesta sulasta vajoaa reaktoripainesäiliön pohjalle
9 tuntia 50 minuuttia	Reaktorin vaurioituessa vapautunut vety palaa suojarakennuksessa

Syöttövesivirtauksen väheneminen höyrystimiin (katso kuva 2.1) heikensi lämmönsiirtoa primääripiiristä sekundääripiiriin, mikä aiheutti primääripiirissä lämpötilan ja paineen

nousua. Turbiinin pikasulun jälkeen primääripiirissä paineistimen (katso kuva 2.1) ulospuhallusventtiili avautui. Venttiilin on tarkoitus suojata primääripiiriä liian suurelta paineelta. Jäähdyte pääsee venttiilin avautuessa putkilinjan eli paineenalennuslinjan kautta säiliöön, jota kutsutaan puhallussäiliöksi. Puhallussäiliössä on murtolevy, joka rikkoontuu, mikäli paine säiliössä kasvaa liian korkeaksi. Tällöin jäähdyte pääsee virtaamaan suojarakennukseen. [15, s. 46][18, s. 2–3]

Paine primääripiirissä kuitenkin jatkoi nousua, mikä aiheutti reaktorin pikasulun. Tehon laskiessa reaktorissa myös paine laskee, jolloin paineistimen ulospuhallusventtiilin kuuluisi sulkeutua. Näin ei kuitenkaan tapahtunut mekaanisen vian vuoksi, joten jäähdytevuoto oli syntynyt. Primääripiirin paineen jatkaessa laskua korkeapaineinen hätäjäähdytysjärjestelmä käynnistyi. Tämä järjestelmä syötti primääripiiriin vettä samaa tahtia, kuin sitä vuoti paineistimesta ulospuhallusventtiilin kautta puhallussäiliöön. Koska paine kasvoi jatkuvan jäähdytevirtauksen vuoksi puhallussäiliössä, säiliön paineenalennusventtiili aukesi, jolloin jäähdyte pääsi virtaamaan suojarakennukseen. [18, s. 2–3][66, s. 1–2]

Valvomossa ei osattu tunnistaa tapahtumia oikein useammasta syystä. Lyhyessä ajassa valvomoon tuli useita eri automaattihälytyksiä ja niitä tulostavan koneen hitauden takia kaikista hälytyksistä ei pysytty perillä niiden tapahtumahetkellä. Paineistimen ulospuhallusventtiili oli saanut sulkukäskyn, mikä näkyi valvomon taululla. Operaattorit kuitenkin tulkitsivat tämän tarkoittavan venttiilin todellista asentoa, joten sen perusteella vuotoa ei osattu epäillä. Operaattorit eivät huomioineet muita vuotoa osoittavia oireita, kuten puhallussäiliön varoventtiilin aukeamista ja lämpötilan nousua paineenalennuslinjassa. Tämä johtui siitä, että he keskittyivät paineistimen pinnan säätöön, sillä pinta paineistimessä oli noussut hyvin korkeaksi. Paineistimen pinta kuvaa jäähdytteen määrää ja normaali-tilanteessa hyvin primääripiirin painetta, jolloin paineen säätö tapahtuu veden ja höyryn osuutta muuttamalla paineistimessä [15, s. 46]. Tässä tapauksessa primääripiirin paine oli laskenut niin alhaiseksi, että jäähdyte oli alkanut kiehumään reaktorissa. Paineistin näyttikin siis veden ja höyryn seoksen yhteistä tilavuutta. Operaattorit eivät tienneet, että vesi oli alkanut reaktorissa kiehua. Heidät oli koulutettu välttämään kaikin keinoin tilannetta, jossa paineistin täyttyisi kokonaan vedellä, sillä höyrypatjan häviäminen paineistimesta estäisi normaalin paineensäädön. Koulutuksensa mukaisesti operaattorit siis vähensivät korkeapaineisen hätäjäähdytysjärjestelmän virtausta reaktoriin paineistimen pinnan laskemiseksi. [18, s. 3–5][30, s. 223]

Noin viisi minuuttia turbiinin pikasulun jälkeen jäähdytteen määrä alkoi vähenemään reaktorissa, sillä hätäjäähdytysvirtausta primääripiiriin oli vähennetty, mutta vuoto paineistimen kautta jatkui. Tämä nosti jäähdytteen lämpötilaa, jolloin yhä kuumempaa jäähdytettä virtasi piiristä ulos. Paineenalennuslinjan puhallussäiliön paine alkoi kasvamaan johtaen lopulta säiliön murtolevyn rikkoontumiseen. Useat oireet osoittivat primääripiirin vuotoa, mutta operaattorien huomion vei paineistimen pinnan tarkkailu. Yli tunti tapahtumien alusta pääkiertopiirin B pääkiertopumput (katso kuva 2.1) päätettiin pysäyttää pumppujen

rikkoutumisen estämiseksi. Pääkiertopumput kavitoivat ja värisivät paineen laskiessa ja höyryn osuuden kasvaessa, joten pumppujen hajoamisen riski oli suuri. Noin 25 minuuttia tämän jälkeen myös pääkiertopiirin A pääkiertopumput pysäytettiin. Tätä ennen pääkiertopumput olivat jäähdyttäneet reaktorin pitämällä veden ja höyryn seoksen liikkeellä. Pääkiertopumppujen pysähtyessä vesi ja höyry erottuivat reaktorissa, jolloin vedenpinta laski sydämen yläreunan (katso kuva 2.1) tasolle. Vuodon jatkuessa vettä höyrystyi yhä enemmän reaktorissa ja sydän alkoi paljastumaan veden alta. Vuoto primääripiiristä loppui vasta, kun paineenalennuslinjan eristysventtiili suljettiin yli kaksi tuntia alkutapah-tuman jälkeen. [18, s. 6–9][66, s. 2–5]

Eristysventtiilin sulkemisen jälkeen tuli yhä selkeämpiä merkkejä vakavasta onnettomuudesta. Primääripiirin vesinäytteen aktiivisuus oli huomattavasti normaalia suurempi ja säteilytasot alkoivat nousta monissa paikoin suojarakennusta. Reaktoriin pyrittiin saamaan jäähdytystä käynnistämällä jotakin pääkiertopumpuista, mutta vain yksi niistä pysyi käynnissä sen aikaa, että reaktoriin saatiin lisää vettä. Polttoaineen sulaminen oli ehtinyt alkaa jo tätä ennen, joten vesi jäähdytti muodostunutta sula-allasta vain osittain. Sula-allas vajosi lopulta reaktoripainesäiliön pohjalle, mutta reaktoripainesäiliö pysyi ehjänä. Myös suojarakennus säilyi ehjänä, minkä takia radioaktiivisten aineiden päästöt jäivät hyvin pieniksi. Vajaa kymmenen tuntia onnettomuuden alun jälkeen suojarakennuksen eheyden vaaransi vetypalo. Polttoaineen suojakuoren lämpötilan noustessa yli 1200 °C:een suoja-kuori reagoi veden kanssa muodostaen vetyä. Vetyä oli vapautunut suojarakennukseen suuria määriä, joten sen syttyminen aiheutti hetkellisen lämpötilan ja paineen nousun suojarakennuksessa. Lopulta ainoa radioaktiivisten päästöjen lähde ympäristöön oli apurakennusten vesitankit, joihin primääripiirin puhdistusjärjestelmä oli siirtänyt vettä. Erityisesti jalokaasut haihtuivat tankeissa ja pääsivät ilmastoinnin mukana ympäristöön. Koska tämän suurempaa päästöä ympäristöön ei tullut, luokiteltiin tapahtuma kansainvälisellä INES-asteikolla (International Nuclear Event Scale) luokkaan 5. [30, s. 225–227][66, s. 5–7]

2.1.2 Onnettomuuden vaikutukset ydinturvallisuuteen

Three Mile Islandin onnettomuuden jälkeen parannuksia tehtiin laitosten suunnittelussa, ydinvoiman valvonnassa, henkilökunnan kouluttamisessa ja inhimillisten virheiden huomioimisessa sekä tutkimuksessa ja kansainvälisessä yhteistyössä. Sekä toiminnassa että suunnitteilla ja rakenteilla oleville ydinvoimaloille lisättiin vaatimuksia liittyen erityisesti mahdollisten poikkeamien ja onnettomuuksien valvontaan sekä vakavan onnettomuuden varautumiseen. Esimerkiksi instrumentointia, mikä kertoo venttiilien todellisesta asennosta, lisättiin laitoksilla. Valvomoiden suunnittelua muutettiin niin, että mahdollisten onnettomuuksien estäminen tai hallinta onnistuisi mahdollisimman hyvin. Instrumentointia lisättiin myös mittaamaan eri prosessisuureita poikkeustilanteiden diagnosoimisen helpottamiseksi.

si. Lisensointiin otettiin yhä laajemmin käyttöön todennäköisyysperusteinen riskianalyysi (PRA, Probabilistic Risk Assessment) ja sen sisältöä muokattiin erityisesti työntekijöiden vaikutuksen suhteen. [25, s. 7–13][46]

Inhimillisen virheen mahdollisuuteen ruvettiin kiinnittämään enemmän huomiota. Valvomoiden muutosten tarkoituksena oli madaltaa inhimillisen virheen mahdollisuutta, mutta myös operaattoreiden koulutusta muutettiin. Koulutusta ja kertauskoulutusta lisättiin ja varsinkin valvomosimulaattoreita hyödynnettiin tässä. Muutoksia tehtiin myös valvomohenkilökunnan määrään ja valvomossa tuli aina olla riittävä määrä operaattoreita, joiden koulutus on riittävä yllättävien tilanteiden hallintaan. [46] Onnettomuustilanteiden ohjeita muutettiin myös. Aiemmin toimintaohjeet perustuivat tapahtumaperäisiin ohjeisiin eli operaattorin piti tunnistaa alkutapahtuma tai tapahtumien sarja, jotta hän osaisi tehdä oikeat toimenpiteet. Erilaisia lähestymistapoja tutkittiin ja esimerkiksi Suomessa siirryttiin hyödyntämään myös oireperäisiä ohjeita, jotka perustuivat turvallisuuden kannalta tärkeiden parametrien pitämiseen sallituissa rajoissa [25, s. 74]. [13] Onnettomuuden jälkeen tunnistettiin tarve tutkia inhimillisen virheen mahdollisuutta niin ihmisen toimintaan vaikuttavien tekijöiden kautta, kuin niiden vaikutusta PRA-analyysiin [54, s. 533–574].

Inhimillisen tekijän vaikutuksen lisäksi tutkimusta lisättiin erilaisten systeemien ja komponenttien toiminnasta normaali- ja onnettomuusoloissa sekä sydänsulan ominaisuuksista. Tutkimuksen pääpaino siirtyi suurista LOCA-tilanteista pienempien vuotojen onnettomuuksiin [9, s. 55]. [25, s. 15] Kokeellisella tutkimuksella pyrittiin selvittämään pienten vuotojen vaikutuksia reaktorin onnettomuuskäyttäytymiseen ja toisaalta saamaan vertailuaineistoksi kelpaavaa mittaustietoa laskennallista mallinnusta varten. Erilaisten koodien käyttöä laskennassa oli ruvettu hyödyntämään jo 70-luvun alussa, mutta onnettomuuden jälkeen termohydraulisten koodien kehittäminen lähti nousuun. Koodien verifiointia ja validointia kehitettiin, jotta niitä pystyttäisiin hyödyntämään turvallisuusanalyysissä. [9, s. 54–56]

Kansainvälistä yhteistyötä lisättiin erityisesti käyttökokemusten jakamisessa. Käyttökokemusten jakamiseen tarkoitetun järjestelmän kehittäminen oli aloitettu jo ennen Three Mile Islandin onnettomuutta ja sen jälkeen järjestelmän tarve tuli yhä enemmän selkeäksi. Käyttökokemusten jakamiseen tarkoitettu järjestelmä IRS (Incident Reporting System) otettiin käyttöön 1981 ensin Taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestön (OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development) ydinenergiajärjestön (NEA, Nuclear Energy Agency) kuuluvissa jäsenmaissa ja vuonna 1983 Kansainvälisen atomienergiajärjestön (IAEA, International Atomic Energy Agency) jäsenmaissa. [23, s. 5] Kansainvälistä yhteistyötä lisättiin myös liittyen avun- ja neuvonantoon mahdollisissa onnettomuustilanteissa ja onnettomuuden jälkeisessä ympäristön ja laitoksen dekontaminoinnissa. [25, s. 15–16]

2.1.3 Muita tapahtuneita vuoto- ja putkikatkoilanteita

Hyvin samankaltainen häiriö alkutapahtumiltaan Three Mile Islandin onnettomuuden kanssa tapahtui Davis-Bessen painevesireaktorilaitoksella vuonna 1985. Häiriö alkoi, kun toinen pääsyöttövesipumpuista pysähtyi. Käyntiin jäänyt pumppu oli manuaalisäädöllä ja lisäksi muiden sattumien takia riittävää syöttöveden virtausta ei saatu höyrystimille ja turbiinille, jolloin primääripiirin paine alkoi nousta. Nämä tekijät aiheuttivat turbiinin ja reaktorin pikasulun hyvin pian pääsyöttövesipumpun pysähtyttyä. Useat lisäviat aiheuttivat alkutapahtuman pahenemisen. Päähöyryventtiilit sulkeutuivat virheellisesti, joten höyryllä toimiva toinen pääsyöttövesipumppu pysähtyi. Operaattorivirheen vuoksi höyrystimet erotettiin muusta piiristä ja apusyöttövesijärjestelmän pumput pysähtyivät, jolloin syöttöveden virtaus loppui täysin. [30, s. 253–254][41]

Noin vartti onnettomuuden alusta höyrystimiin saatiin vettä moottorikäyttöisellä syöttövesipumpulla sekä palautetulla apusyöttövesijärjestelmällä. Primääripiirin paine oli nousut heikentyneen lämmönsiirron takia, joten paineistimen ulospuhallusventtiili oli ehtinyt avautua ja sulkeutua pari kertaa, ennen kuin operaattori alkoi tarkkailla paineistinta. Kolmannella kerralla ulospuhallusventtiili juuttuikin auki, mutta operaattori ei tätä huomannut, sillä hän ei katsonut venttiilin asennosta kertovaa näyttöä. Varotoimenpiteenä operaattori sulki kuitenkin ulospuhallusventtiilin jälkeisen eristysventtiilin katkaisten vuodon noin 30 sekuntia sen alkamisen jälkeen. Operaattorit toimivat monilta osin oikein häiriötilanteessa, mutta tämäkin tapahtuma osoitti vielä puutteita turvallisuussuunnittelussa. Kyseisellä laitoksella oli aiemmin huomattu vikaa pääsyöttövesipumpuissa, mutta toimenpiteitä vikojen korjaamiseksi ei ollut tehty ja lisäksi häiriötilanteen aikana tehdyt toimenpiteet eivät olleet täysin riittäviä, minkä takia alkutilanne kehittyi vakavammaksi. [30, s. 253–254][41]

Suomessa on tapahtunut kaksi isoa putkikatkoilannetta. Molemmat ovat tosin olleet sekundääripiirin puolella, joten tapahtumien kulku poikkeaa primääripiirin LOCA-tilanteesta. Loviisa 2 -laitosyksiköllä tapahtui syöttövesiputken katkeaminen vuonna 1993 laitoksen käydessä täydellä teholla. Kyseiseen putkeen liittynyt syöttövesipumppu oli ollut poissa käytöstä ja sitä lämmitettiin käynnistämistä varten. Putken katkeaminen tapahtui tällöin hitsaussaumasta. Vuoto aiheutti paineenlaskua sekundääripiirissä, johon valvomohenkilökunta reagoi reaktorin pikasululla ja vuotokohdan erottamisella. Turvallisuusautomaatio toimi tilanteessa oikein eli paineen laskiessa syöttövesipumput pysähtyivät ja hätäsyöttövesijärjestelmä käynnistyi syöttämään höyrystimille vettä. Koska laitos toimi suunnitellusti ja valvomohenkilökunta reagoi nopeasti sekä oikealla tavalla, vahingot jäivät hyvin vähäisiksi. [30, s. 265][68]

Vastaava putkikatko oli tapahtunut myös Loviisan toisella laitosyksiköllä 1990. Tällöin myös henkilökunta ja turvallisuusjärjestelmät toimivat suunnitellulla tavalla, joten häiriö ei kehittynyt onnettomuudeksi. Putkikatkon aiheutti molemmissa tapauksissa eroosiokorroosio. Ensimmäinen putkikatko huomioitiin laitoksen turvallisuudessa ja sekundääripiiristä

uusittiin paljon putkistoa. Kuitenkin tulkintavirhe laatutarkastettavien kohteiden määrittelyssä johti siihen, että myöhemmin katkennutta kohtaa syöttövesiputkessa ei tarkastettu. Nämä häiriötilanteet osoittivat tarkastusten sekä laadunvalvonnan tärkeyden ja nykyään putkiston määräaikaistarkastuksia kohdennetaan PRA:n avulla [78, s. 10]. [30, s. 265][68]

2.2 Viranomaisvaatimukset turvallisuusjärjestelmille ja -analyysituloksille

Suomessa vaatimukset turvallisuusjärjestelmille ja analyysituloksille on esitetty Säteilyturvakeskuksen (STUK) laatimissa ydinturvallisuusohjeissa (YVL-ohjeet). Ohjeet eivät itessään ole velvoittavia käytössä ja rakenteilla oleville ydinvoimaloille, vaan STUKin antamissa määräyksissä määritellään, kuinka ohjeita tulee soveltaa. YVL-ohjeet taas perustuvat ydinenergialakiin ja -asetuksiin. Suurin osa STUKin laatimasta säännöstöstä perustuu kansainvälisiin ohjeisiin, sääntöihin ja sopimuksiin, joissa Suomi on mukana. Erityisesti näissä on hyödynnetty IAEA:n ja WENRAn (Western European Nuclear Regulators Association) ohjeita, jotka perustuvat jäsenmaiden sopimuksiin ja kansainväliseen tutkimukseen. [38][80]

Ydinvoimalaitoksilla turvallisuuden tulee olla niin korkealla tasolla kuin mahdollista, mitä kutsutaan SAHARA-periaatteeksi (Safety As High As Reasonable Achievable). Häiriöiden ja onnettomuuksien mahdollisuus on aina olemassa, minkä takia ydinvoimalaitoksilla on turvallisuusjärjestelmiä. [26, s. 91] Näillä järjestelmillä pyritään viimekädessä estämään radioaktiivisten aineiden pääsy ympäristöön kaikissa mahdollisissa tilanteissa. Ydinvoimalaitoksilla on useampia peräkkäisiä leviämisesteitä, joiden avulla radioaktiiviset aineet pidetään laitoksen sisäpuolella. Ensimmäinen este on itse polttoainesauva, jossa sekä keraamisessa muodossa olevat polttoainetabletit että kaasutiivis suojakuori toimivat fyysisinä esteinä. Toisena esteenä toimii primääripiiri ja kolmantena suojarakennus. Molempien täytyy olla tiiviitä ja paineenkestäviä toimiakseen tarkoitetulla tavalla. Peräkkäiset leviämisesteet ovat myös syvyysuuntaisen turvallisuusperiaatteen mukaisia. [26, s. 97][64, s. 6–8]

Syvyysuuntainen turvallisuusperiaate tai syvyyspuolustusperiaate tarkoittaa sitä, että odotettavissa olevia käyttöhäiriöitä ja onnettomuuksia ehkäistään tai niiden seurauksia lievennetään useilla toisiaan varmentavilla peräkkäisillä toiminnallisilla tasoilla [64, s. 5–6]. LOCA:n tapauksessa ennaltaehkäisevä toimenpide on putkistojen säännölliset tarkastukset ja huollot. Toisen tason tehtävänä on huomata poikkeamia laitoksen normaalitoiminnassa, kuten putkivuodot, ja tehdä tarvittavat toimenpiteet laitoksen saattamiseksi turvalliseen tilaan. Mikäli tästäkin huolimatta alkutapahtuma kehittyy onnettomuudeksi, kolmanteen tasoon kuuluvat onnettomuuden hallintaan liittyvät järjestelmät, kuten reaktorin hätäjäähdytysjärjestelmä. Näiden tasojen jälkeen ovat vielä neljäs ja viides taso, jotka on suunniteltu vakavien onnettomuuksien seurauksien lieventämiseen sekä valmius- ja

pelastustoimenpiteisiin. [26, s. 101][80, s. 15–21]

Turvallisuusjärjestelmät mitoitetaan suunnitteluperusteonnettomuuksien mukaan. Kaikkia mahdollisia onnettomuus- ja häiriötilanteita ei mitoituksessa käytetä, vaan analyyseissä otetaan rajoittavat tapaukset huomioon. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi turvallisuusjärjestelmät, jotka on mitoitettu suuren LOCAN mukaan, selviytyvät myös pienempien vuotojen häiriötilanteista tai onnettomuuksista. Ydinvoimalaitos itsessään tulee myös suunnitella niin, että sen luonnolliset takaisinkytkennät hillitsevät tehonkasvua esimerkiksi reaktiivisuusonnettomuuksissa (RIA, Reactivity Initiated Accident) tai käyttöhäiriöissä ilman pikasulkua (ATWS, Anticipated Transient Without Scram). Kevytvesireaktorit on suunniteltu siten, että veden, joka toimii sekä jäähdytteenä että moderaattorina, höyrystyminen reaktorissa LOCAN aikana saa tehon laskemaan ja reaktori voi sammua jo ennen reaktorin pikasulkua [8, s. 22][15, s. 36].

Häiriö- tai onnettomuustilanteissa ydinvoimalaitos tulee saattaa ensiksi hallittuun tilaan ja lopulta turvalliseen tilaan. Molemmissa tiloissa reaktori on sammutettu ja sen jäähdytys on turvattu, mutta turvallisessa tilassa lisäksi reaktorin tulee olla paineeton [64, s. 1–3]. Näiden ja muiden turvallisuusvaatimusten täytyminen laitoksen ja turvallisuusjärjestelmien suunnittelussa sekä käytössä todetaan determinististen turvallisuusanalyysien avulla [80, s. 12]. Analyyseissä käytetään laskennallisia ja joskus kokeellisia menetelmiä. Turvallisuusanalyysinä tehdään erityyppisille laitostapahtumille, jotka voidaan jakaa normaaleihin käyttötilanteisiin (DBC1), odotettavissa oleviin käyttöhäiriöihin (DBC2), oletettuihin onnettomuuksiin (DBC3, DBC4) ja niiden laajennuksiin (DEC, Design Extension Condition) sekä vakaviin reaktorionnettomuuksiin [79, s. 41–42]. Ensimmäisiä luokkia kutsutaan suunnitteluperustetilanteiksi (DBC, Design Basis Condition) [12, s. 83]. Jokaiselle tapahtumaluokalle on omat vaatimukset alkuoletusten ja analyysituloksien suhteen. [52, s. 170–175][75, s. 4–8]

LOCA voi kuulua vuodon koosta riippuen luokkiin DBC2-4 tai luokkaan DEC yhdessä jonkun turvallisuustoimintoa suorittavan järjestelmän yhteisvian kanssa. Näiden analyysiin on YVL-ohjeissa määritetty vaatimukset liittyen polttoaineen eheyteen, ylipainesuojauksiin ja suojarakennuksen eheyteen. Vaatimukset ovat sitä tiukemmat, mitä todennäköisempää tarkasteltavan häiriön tai onnettomuuden tapahtuminen laitoksen eliniän aikana on. [52, s. 173][75, s. 16–17] Taulukossa 2.2 on esitetty joitakin vaatimuksia, joita tarkastellaan LOCA-tilanteessa.

Vaatimuksilla varmistetaan peräkkäisten leviämissesteiden eheys. Koska LOCA-tilanteessa primääripiirin eheys menetetään, tarkastelu kohdistuu polttoaineen lämpötilaan vaikuttaviin tekijöihin ja suojarakennuksen paineeseen. DBC2-tilanteita tapahtuu todennäköisesti laitoksen käyttöiän aikana eli kerran tai useammin sadan vuoden aikana [80]. Vaatimukset ovat tästä syystä tiukemmat näissä tapahtumissa, jotta voidaan suurella varmuudella osoittaa, ettei polttoaine vaurioidu ja suorarakennus vuoda. [12, s. 27–30] DBC3-

Taulukko 2.2. Joitakin tuloksille asetettuja hyväksymiskriteerejä YVL-ohjeista tapahtumaluokan mukaan [74, s. 9–11][75, s. 16–17][77, s. 6–7].

Luokka	Suojakuoren maksimilämpötila	Lämmönsiirtokriisi polttoainesauvoista	Suojarakennuksen paine
DBC2	Lämmönsiirtokriisi-vaatimus riittää	< 0,1 %	Muut vaatimukset riittävät
DBC3	< 650 °C	< 1 %	1,1*paine < suunnittelupaine
DBC4	< 1200 °C	Ei vaatimusta	1,1*paine < suunnittelupaine
DEC	< 1200 °C	Ei vaatimusta	Ei vaatimusta
Vakava onnettomuus	Ei vaatimusta	Ei vaatimusta	1,5*paine < suojarakennuksen tiiviysraja

onnettomuuksien esiintymistodennäköisyys on kerran sadasta tuhanteen vuoteen ja DBC4-onnettomuudet esiintyvät tätä harvemmin [80]. DBC3-tilanteissa suojakuoren kestävyys ei saa vaarantua, mihin riittää taulukossa 2.2 annettu yläraja maksimilämpötilalle. DBC4-tilanteissa vaurioituvien polttoainesauvojen määrälle on asetettu raja alle kymmeneen prosenttiin, kun taas DEC-tapahtumille ei vastaavaa vaatimusta ole. Kuitenkin molemmissa on vaatimuksena, että laitos selviää kyseisistä onnettomuuksista ilman vakavia polttoainevaurioita [80]. Vakavissa reaktorionnettomuuksissa oletuksena on, että polttoaine vaurioituu merkittävästi, joten vaatimuksia on asetettu vain suojarakennukselle ja sen turvallisuusjärjestelmille [77, s. 6–12]. [75, s. 16–17]

Myös analyysimenetelmille on asetettu vaatimuksia YVL-ohjeissa. Analyysejä tehdään erilaisilla laskentaohjelmistoilla, joiden luotettavuus täytyy todentaa vertailemalla kokeellisiin tuloksiin, tapahtuneisiin häiriötilanteisiin ja joskus jopa onnettomuuksiin. Myös validoituja laskentaohjelmia voidaan käyttää apuna uuden ohjelmiston tarkastelussa. Laskentaohjelmissa on kuitenkin aina epätarkkuutta ja esimerkiksi ihmisten käyttäytymistä häiriötilanteissa ei pystytä ennustamaan suurella varmuudella. Tämän takia analyyseissä tulee käyttää joko konservatiivista laskentatapaa herkkyysanalyysin kanssa tai parhaan arvion laskentatapaa epävarmuusanalyysillä täydennettynä. Konservatiivinen analyysitapa tekee epäedullisimmat oletukset niin alkutilanteen kuin laskentamallien ja turvallisuusjärjestelmien kapasiteettien suhteen. Tällöin analyysitulokset ovat suurella varmuudella vakavampia kuin analysoitavan onnettomuuden seuraukset, joten turvallisuusvaatimusten täytyminen on helppo osoittaa. [12, s. 7] Parhaan arvion ja epävarmuusanalyysin laskentamenetelmässä hyödynnetään realistisempia laskentakoodeja. Konservatiivisia oletuksia tehdään jossain määrin alkutapahtumien ja järjestelmien käytettävyyden suhteen. [12, s. 8] Epävarmuusanalyysimenetelmällä saadaan myös paljon enemmän tietoa tarkasteltavasta onnettomuudesta, sillä laskettava tapaus toistetaan useaan kertaan varioimalla keskeisiä lähtöparametreja. [52, s. 172–175][75, s. 8–9]

2.3 Turvallisuusjärjestelmät jäähdytteenmenetysonnettomuuden varalle

STUKin mukaan turvallisuusjärjestelmien suunnittelussa on huomioitava tapahtumat, jotka mahdollisesti uhkaavat peräkkäisten leviämisseiden eheyttä. Mahdollisia alkutapahtumia voisivat olla putkimurtumat, laiteviat, virheelliset toiminnot tai automaation ohjaukset sekä sisäiset tai ulkoiset uhat. [80, s. 16] LOCA-tilanne voisi alkaa primääripiirin putken katkeamisesta, primääripiirin ulospuhallusventtiilien virheellisestä toiminnasta tai hajoamisesta, tai käyttöhenkilökunnan virheellisestä toiminnasta. Turvallisuussuunnittelussa on näihin tapahtumiin varauduttu sekä ennaltaehkäisevästi että lieventävästi ja turvallisuutta varmistavasti häiriön sattuessa. [26]

Turvallisuusjärjestelmien suunnittelussa täytyy huomioida laitteiden vikaantumisen mahdollisuus, jolloin vikaantuminen ei saa estää järjestelmän toimintaa. Tärkeimpien toimintojen varmistamiseksi käytetään rinnakkaisperiaatetta, erotteluperiaatetta ja erilaisuusperiaatetta. [64, s. 8] Rinnakkaisperiaate tarkoittaa sitä, että samaa toimintoa voi tehdä useampi rinnakkainen järjestelmä tai komponentti. Rinnakkaiset järjestelmät tai komponentit sijoitetaan usein fyysisesti eri tiloihin erotteluperiaatteen mukaisesti. Esimerkiksi tässä työssä tarkasteltavalla Olkiluoto 3 -laitosyksiköllä (OL3) rinnakkaiset turvallisuusjärjestelmät sijaitsevat eri rakennuksissa, mikä rajoittaisi esimerkiksi tulipalon tai tulvan vaikutukset yhteen osajärjestelmään [33, s. 76]. Jotta voidaan sulkea pois laitteiden tyyppiviat ja näin rinnakkaisten järjestelmien yhtäaikainen pettäminen, samaa toimintoa tekevät rinnakkaiset komponentit voivat käyttää eri toimintaperiaatetta. Rinnakkaisilla pumpuilla voisi olla vaikka eri käyttövoima, jolloin toteutuu erilaisuusperiaate. Näiden lisäksi komponentit asettuvat turvalliseen tilaan vikaantuessa ja tarvittavat turvallisuusjärjestelmät käynnistyvät automaattisesti häiriön tapahtuessa [64, s. 8]. Esimerkiksi Olkiluodossa laitosyksiköiden tulee selviytyä puoli tuntia ilman käyttöhenkilökunnan toimenpiteitä, jotta heille jää riittävästi harkinta-aikaa tarvittavien toimenpiteiden valintaan [80, s. 30]. [26, s. 102–104] Laitoksen suunnittelun lisäksi mahdollisia alkutapahtumia ehkäistään toistuvilla tarkastuksilla ja koestuksilla, muiden käyttökokemuksia hyödyntämällä, henkilöstön jatkuvalla koulutuksella ja hyvän turvallisuuskulttuurin ylläpitämisellä [26, s. 106–111].

PWR-laitoksella reaktorin jäähdytysjärjestelmän eli primääripiirin tehtävänä on poistaa polttoaineen tuottamaa lämpöä ja siirtää se höyrystimien kautta sekundääripiiriin. Reaktorin jäähdytysjärjestelmä osallistuu myös reaktiivisuuden säätöön muuttamalla neutroneita absorboivan boorin pitoisuutta jäähdytteessä. Reaktorin sammutuksen jälkeen polttoaineen tuottama jälkilämpö poistetaan jälkilämmönpoistojärjestelmällä. Järjestelmässä on lämmönvaihtimia, joilla lämpö siirretään esimerkiksi meriveteen. Normaalin käyttötilan varmistamiseksi jäähdytysjärjestelmässä on useita eri mittauksia, joiden avulla voidaan tarkkailla esimerkiksi jäähdytteen lämpötilaa tai painetta eri osissa primääripiiriä. Mahdollisen LOCA-tilanteen sattuessa ydinvoimalaitoksella on hätäjäähdytysjärjestelmä

reaktorin jäähtymisen turvaamiseksi. Tämän lisäksi suojarakennus estää radioaktiivisten aineiden leviämisen ympäristöön onnettomuustilanteessa. [15, s. 46, 58–61]

Reaktorin hätäjäähtytysjärjestelmä koostuu matala- ja korkeapaineisesta hätäjäähtytysjärjestelmästä sekä PWR:n tapauksessa myös paineakkujärjestelmästä. Paineakut ovat passiivisia painesäiliöitä ja ne alkavat purkautua primääripiiriin, kun piirin paine on vuodon seurauksena laskenut akkujen tasolle. Matala- ja korkeapaineisen järjestelmän pumpput ovat varmennettu dieselgeneraattoreilla, mikäli ulkoinen sähkönsyöttö laitokselle menettäisiin onnettomuustilanteessa. Suuremman vuodon tapauksessa hyödynnetään kaikkia hätäjäähtytysjärjestelmiä, mutta pienissä vuotoissa ainoastaan korkeapaineista järjestelmää, joka pystyy syöttämään vettä primääripiiriin paineen ollessa vielä korkealla. [15, s. 59–61]

OL3 -laitosyksikkö on eurooppalainen painevesireaktori (EPR, European Pressurized water Reactor), jonka nimellislämpöteho on 4300 MW [33, s. 46, 53]. Laitosyksiköllä on tavallisten PWR-laitosten tapaan kaksi eri paineessa toimivaa hätäjäähtytysjärjestelmää sekä passiiviset paineakut. Jäähtytysjärjestelmän putket on suunniteltu käyttämällä vuoto ennen murtumaa -periaatetta (LBB, Leak Before Break). Ajatuksena on, että putkesta kehittyvä pahimmassa tapauksessa vain pieni paikallinen vuoto, joka on mahdollista havaita ennen suurta putkimurtumaa [76]. Laitosyksiköllä on tästä syystä vuodonvalvontajärjestelmä, jonka tehtävänä on havaita pienetkin vuodot mittaamalla suojarakennuksen ilmankosteutta ja lämpötilaa sekä vuodonkeruujärjestelmien tankkien pinnankorkeutta [19]. Hyvin pienet vuodot pystytään kompensoimaan normaalikäytön aikana toiminnassa olevalla kemikaalien- ja tilavuudensäätöjärjestelmällä. Järjestelmä säätää jäähtytteen määrää primääripiirissä syöttö- ja uloslaskulinjojen kautta, joten syöttölinjasta saadaan pienen vuodon tapauksessa vettä primääripiiriin samaa tahtia kuin sitä pääsee vuodon kautta pois [45].[72]

Laitosyksiköllä on korkeapaineisen hätäjäähtytysjärjestelmän sijaan keskipaineinen hätäjäähtytysjärjestelmä. Tämä järjestelmä syöttää vettä noin 98 baarin paineella, mikä on huomattavasti primääripiirin normaalia 155 baarin käyttöpainetta alhaisempi. Erityisesti pienten vuotojen tapauksessa primääripiirin paine ei välttämättä laske näin alhaiseksi, minkä takia laitosyksiköllä on käytössä osittainen jäähtytys. Osittaisessa jäähtytysessä sekundääripiirin painetta lasketaan ulospuhallusventtiilien avulla, jolloin sekundääripiiri poistaa tehokkaammin lämpöä primääripiiristä jäähtyttäen sitä. Samalla myös primääripiirin paine laskee, jolloin mahdollistetaan keskipaineisen hätäjäähtytysjärjestelmän toiminta. Suuren LOCAN tapauksessa, mikäli vuoto olisi kylmässä haarassa, hätäjäähtytysyöttö matalapaineisesta järjestelmästä vaihdetaan kylmästä haarasta kuumaan haaraan. Toimenpiteellä rajoitetaan suojarakennuksen paineen nousua, ehkäistään boorin kiteytymistä sydämessä ja varmistetaan reaktorin turvallisen tilan saavuttaminen. [14][61]

Laitosyksiköllä on passiivinen täyspainesuojarakennus, jonka massiiviset betonirakenteet

toimivat pääasiallisena lämpönieluna LOCA:n alkuvaiheessa. Suojarakennus kestää siis LOCA:ssa vapautuvan veden ja höyryn aiheuttaman lämpötilan ja paineen nousun ilman erillisiä toimenpiteitä [15, s. 63]. Onnettomuustilanteessa suojarakennuksen eristystoiminto käynnistyy automaattisesti. Kyseinen toiminto eristää suojarakennuksen läpivienneistä ne, joita ei tarvita onnettomuuden hallintaan. Tällä tavoin estetään radioaktiivisten aineiden vapautuminen suojarakennuksen ulkopuolelle. [7] Suojarakennuksen ja turvallisuusjärjestelmien suunnittelussa on huomioitu suunnitteluperustetilanteiden lisäksi vakavien reaktorionnettomuuksien olosuhteet. Laitosyksiköllä on passiiviset vedyn- ja sydän-sulanhallintajärjestelmät, jotka mahdollistavat selviytymisen vähäisin ympäristöpäästöin, vaikka putkikatkotilanteen hallitsemiseksi suunnitellut turvallisuusjärjestelmät pettäisivät ja LOCA kehittyisi vakavaksi reaktorionnettomuudeksi. [44]

3 JÄÄHDYTTEENMENETYSONNETTOMUUDEN VAIHEET JA TUTKIMUS

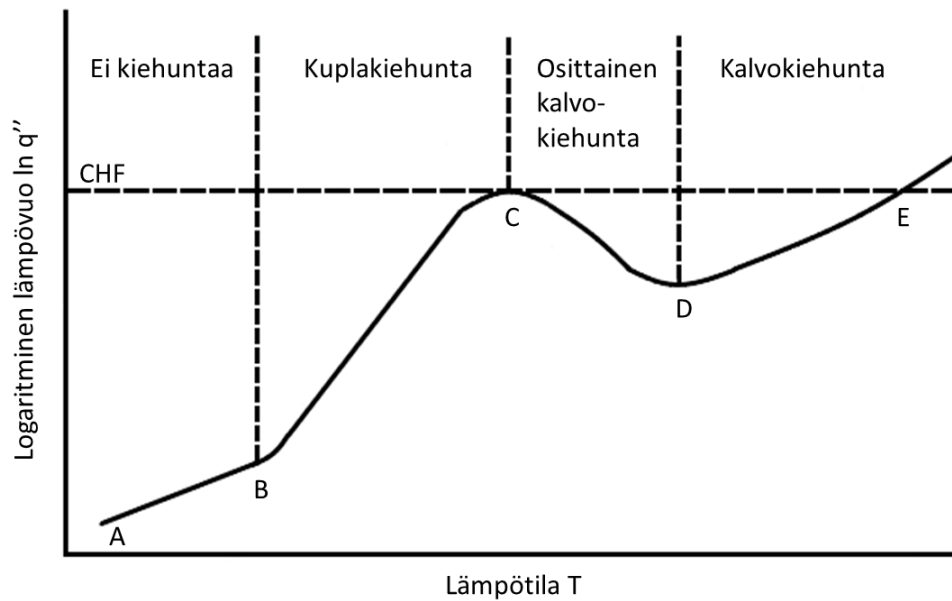
Jotta ydinturvallisuutta voidaan toteuttaa SAHARA-periaatteella, on tärkeä ymmärtää onnettomuustilanteiden kulkuun liittyviä vaiheita sekä eri vaiheissa esiintyviä fysikaalisia ilmiöitä. LOCA-analyyseissä tärkeimpiä tarkasteltavia ilmiöitä ovat kaksifaasivirtaus ja lämmönsiirto, sillä näillä on suuri vaikutus esimerkiksi polttoainesauvan suojakuoren lämpötilaan ja sitä kautta suojakuoren eheyteen. [52, s. 172–173] Lisäksi ilmiöiden ymmärtäminen on erittäin tärkeää laskennallisten menetelmien kehittämisen kannalta. [52, s. 175]

Virtauksen ja lämmönsiirron keskinäistä vuorovaikutusta sekä näiden ilmiöiden vaikutusta ympäröiviin rakenteisiin kutsutaan termohydrauliikaksi. Termohydraulisia laskentakoodeilta osoitetaan, että ydinvoimalaitos täyttää sekä laitoksen käyttö- että turvallisuussuunniteluun liittyvät vaatimukset. [9, s. 144–146, 245] Jotta näitä koodeja voidaan kehittää, tarvitaan kokeellista tutkimusta. Monimutkaisia fysikaalisia ilmiöitä on usein hankala mallintaa, jolloin empiiristen korrelaatioiden käyttäminen on välttämätöntä. Lisäksi kokeellisista tutkimuksista saadaan mittaustietoa, jota voidaan hyödyntää laskentakoodien validoinnissa [9, s. 123]. [52, s. 175–176]

3.1 Polttoaineen ja jäähdytteen lämmönsiirto

Jotta suojakuoren maksimilämpötila voitaisiin turvallisuusanalyseissä laskea, tarvitaan tietoa lämmönsiirrosta polttoaineessa ja jäähdytteessä. Polttoainesauvassa tuotettu lämpö siirtyy sauvan sisältä ulkoreunalle johtumalla. Lämpö siirtyy heliumilla täytetyn kaasuraon yli suojakuorelle ja suojakuoren läpi polttoainesauvan pinnalle pääosin johtumalla. Osa lämmöstä siirtyy myös säteilemällä, mutta normaalikäytön aikana tämä on hyvin pieni osuus, joten se voidaan jättää huomioimatta. [40, s. 417] Lämmönjohtavuuteen vaikuttavat hyvin paljon materiaaliominaisuudet, joten polttoaineen lämmönjohtavuus muuttuu käyttöjakson aikana. Fissio- ja hajoamisreaktioiden takia polttoaineen koostumus muuttuu reaktorin normaalikäytön aikana ja kaasumaisia fissiotuotteita kertyy kaasurakoon muuttaen polttoaineen ja kaasuraon lämmönjohtavuutta. [1, s. 255–256]

Lämmönsiirto suojakuoren pinnalta jäähdytteeseen tapahtuu konvektiolla. Kun jäähdytteen ja suojakuoren lämpötilat ovat alle saturaatiopisteen, jäähdytteessä ei tapahdu kie-



Kuva 3.1. Kiehumisen vaiheet esitetty logaritmissen lämpövuon ja suojakuoren lämpötilan funktiona. Muokattu lähteestä [40, s. 442].

humista. Vaihe voidaan nähdä kuvassa 3.1 pisteiden A ja B välillä. Kun suojakuoren lämpötila kasvaa riittävän korkeaksi, sen pinnalla alkaa muodostumaan kuplia. Tätä vaihetta kutsutaan kuplakiehumnaksi. PWR:n tapauksessa tällöin on myös kyse alijäähtyneestä kiehumnasta, sillä jäähdytteen lämpötila on alle saturaatiopisteen, jolloin kuplat joko romahtavat suojakuoren pinnalle tai lauhtuvat irrotessaan jäähdytteen sekaan. Kuvasta 3.1 nähdään, että välillä B ja C lämpövuon kasvaa selkeästi nopeammin kuin ilman kiehumista. Tämä johtuu siitä, että kuplien mukana lämpö siirtyy tehokkaasti suojakuorelta jäähdytteen. [40, s. 441–443]

Kun suojakuoren lämpötila kasvaa, kuplien koko kasvaa myös, kunnes saavutetaan kriittinen lämpövuon (CHF, Critical Heat Flux). Tällöin kuplat alkavat muodostamaan höyrykalvoa polttoainesauvan pinnalle, jolloin lämmönsiirto heikkenee merkittävästi, kuten kuvassa 3.1 pisteiden C ja D välillä nähdään. Siirtyminen kuplakiehumnasta kalvokiehumtaan on myös esitetty kuvassa 2.1. Osittaisen kalvokiehumnan alkamista kutsutaan lämmönsiirtokriisiksi. Kun polttoainesauva joutuu lämmönsiirtokriisiin, suojakuoren lämpötila alkaa nousemaan nopeasti. [1, s. 315–318] Tästä syystä lämmönsiirtokriisiin joutuvien polttoainesauvojen määrä on rajattu turvallisuusvaatimuksissa taulukon 2.2 mukaan. Vaatimusten täytyminen tarkastellaan lämmönsiirtokriisin marginaalin avulla (DNBR, Departure from Nucleate Boiling Ratio), joka on kriittinen lämpövuon jaettuna todellisella lämpövuolla. DNBR:n täytyy olla aina riittävän suuri, jotta voidaan suurella varmuudella välttää lämmönsiirtokriisi. [40, s. 451] Kuvan 3.1 pisteen D jälkeen kiehumta vaihtuu täysin kalvokiehumnan alueelle. Kyseisen pisteen lämpötila ja lämpövuon ovat pienimmät mahdolliset, jotka pystyvät ylläpitämään kalvokiehumtaa. [1, s. 317]

3.2 Onnettomuuden vaiheet

Suurta LOCAa käytetään yleensä suunnitteluperusteonnettomuutena ydinvoimaloissa, sillä onnettomuus asettaa rajoittavia vaatimuksia polttoaineen, reaktorin, hätäjähdytysjärjestelmien ja suojarakennuksen suunnittelulle. Suuresta LOCAsta voidaan erotella neljä PWR:lle tyypillistä vaihetta. Ensimmäistä näistä kutsutaan ulospuhallusvaiheeksi (blow-down). Tällöin primääripiirin paine laskee voimakkaasti sekunnin murto-osassa onnettomuuden alun jälkeen ja jäähdyte höyrystyy reaktorissa. Paineen lasku primääripiirissä hidastuu vasta, kun jäähdyte on kiehumispisteessä. Polttoaineen ollessa höyryn ympäröimänä höyryn negatiivinen takaisinkytkentä saa reaktorin alikriittiseksi, joten reaktorin tehontuotto tippuu nopeasti jälkitehon tasolle. Lämmönsiirto jäähdytteeseen heikkenee, joten polttoaineeseen varastoitunut energia alkaa lämmittämään polttoainesauvan suojakuorta. Kaikki tämä tapahtuu muutaman sekunnin aikana. Hätäjähdytysjärjestelmä käynnistyy automaattisesti pian onnettomuuden alun jälkeen tyypillisesti primääripiirin paineeseen perustuvasta suojauksesta. Aluksi kuitenkin suurin osa hätäjähdytysvirtauksesta vuotaa primääripiiristä pois. Kun jäähdyte alkaa kertymään reaktoripainesäiliön alatilaan (katso kuva 2.1), ulospuhallusvaihe päättyy ja alkaa reaktoripainesäiliön uudelleentäytyminen (refill). [51, s. 43–44][52, s. 177–179]

Uudelleentäytyminen alkaa noin puoli minuuttia onnettomuuden alun jälkeen. Hätäjähdytysvirtaus täyttää reaktoripainesäiliötä ja vedenpinta reaktorissa nousee sydämen alatasolle (katso kuva 2.1). Vedenpinnan noustessa edelleen alkaa sydämen uudelleentulitusvaihe (reflood). Vesi tunkeutuu silloin sydämeen ja polttoainesauvojen väliin. Tällöin puhutaan myös sammutusrintamasta (quench front), jolla tarkoitetaan sitä, että polttoainesauvan ympärillä on vettä höyryn sijaan. Suojakuoren lämpötilan nousu lakkaa, kun sammutusrintama on edennyt niin korkealle, että se jäähdyttää polttoainetta riittävästi. [51, s. 44][52, s. 179–181] Pienempien vuotojen tapauksessa ilmiöt eivät ole yhtä rajuja ja paine ei laske yhtä voimakkaasti kuin suuressa LOCAssa. Sydän voi pienemässäkin LOCAssa paljastua, jos esimerkiksi korkeapaineinen hätäjähdytysjärjestelmä ei syötä vettä riittävästi primääripiiriin vuodon kompensoimiseksi tai paine ei laske painakkujen paineen tasolle. [51, s. 44] Tässä työssä onnettomuuden vaiheita käsitellään lähinnä suuren LOCA:n tapauksessa, sillä eri ilmiöt ovat sen tapauksessa selkeimpiä.

3.2.1 Ulospuhallus ja kriittinen virtaus

Ulospuhallus alkaa voimakkaalla paineen laskemisella suuressa LOCAssa, joka koettelee reaktorin ja primääripiirin mekaanista kestävyyttä. PWR-laitokset tulee tästä syystä suunnitella siten, ettei jäähdytys reaktorissa vaarannu eli primääripiiri kestää paineen laskusta syntyvät paineaallot rakenteissa. [47, s. 51–52] Paineen lasku aiheuttaa voimakasta höyrystymistä primääripiirissä. Tämä johtuu siitä, että lämpötila ei ehdi laskemaan aluksi, mutta primääripiirin paine ja sitä vastaava höyrystymislämpötila laskevat nopeasti. Jääh-

dytteen virratessa suojarakennukseen, paine ja lämpötila alkavat nousemaan suojarakennuksessa. Paineen maksimiarvoon vaikuttavat sekä jäähdytteen että suojarakennuksen ilman massa, lämpötila ja paine ennen vuototapahtumaa. Vuodon alkaessa vuotovirtauksen nopeus vaikuttaa pääasiassa maksimipaineen arvoon. [67, s. 239–240] Primääripiirin normaalikäytön aikainen paine on suojarakennuksen paineeseen nähden niin korkea, että onnettomuuden alkuvaiheen vuotovirtaus on aina kriittinen. [9, s. 259–267]

Kriittiseksi virtaukseksi kutsutaan maksimivirtausnopeutta, joka kokoonpuristuvalla väliaineella voi olla sen virratessa korkeapaineisesta tilasta matalapaineiseen tilaan. Jos paine-ero ei ole kovin suuri näiden kahden välillä, paine-ero vaikuttaa vuotovirtauksen nopeuteen. Paine-eron kasvaessa riittävän suureksi matalapaineisen tilan paine ei enää vaikuta vuotovirtauksen suuruuteen. Tämä johtuu siitä, että paineen aleneminen primääripiirissä etenee paineaaltoina virtausta vastaan ja paineaallon etenemisellä on maksiminopeus [67, s. 356]. Kriittisessä virtauksessa vuotovirtauksen nopeus on yhtä suuri kuin paineaallon etenemisen maksiminopeus eli äänennopeus kyseisessä virtauksessa. Virtausnopeuteen vaikuttavat tällöin vain korkeapaineisen tilan ominaisuudet eli paine, kitka ja vuotokohdan ominaisuudet, kuten venttiilin geometria tai katkenneen putken poikkipinta-ala. [1, s. 187–189][9, s. 265–267][67, s. 507–510]

Ulospuhallusvaiheessa suojakuoren lämpötilaa nostaa polttoaineeseen varastoitunut lämpö. Normaalikäytön aikana suojakuoren lämpötila on 300 °C:een ja 400 °C:een välillä, mutta polttoainesauvan keskellä lämpötila voi olla 1200 °C:een ja 2000 °C:een välillä. Polttoainesauvat joutuvat suurella LOCAssa lämmönsiirtokriisiin jäähdytteen voimakkaan höyrystymisen takia, jolloin suojakuoren ja polttoaineen keskipisteen välinen lämpötilaero alkaa tasaantumaan hyvinkin nopeasti [9, s. 298–299]. Myös radioaktiivisen hajoamisen tuottama jälkilämpö nostaa suojakuoren lämpötilaa, mutta sen merkitys on suurempi myöhemmissä onnettomuuden vaiheissa. [51, s. 65]

Suojakuoren lämpötilaan kiinnitetään huomiota, sillä sen kestävyys heikkenee lämpötilan noustessa. Vesijäähdytteisten reaktoreiden polttoaineissa käytetään pääsääntöisesti seostettua zirkoniumia suojakuoren materiaalina. Suojakuoren lämpötilan noustessa yli 800 °C:seen sen hapettuminen muodostuu ongelmaksi. Hapettumisessa suojakuoren oksidikerros reagoi veden kanssa hajottaen sitä ja muodostaen vetyä ja happea. Osa vedystä ja hapesta siirtyy oksidikerroksen läpi suojakuoren pinnalle ja reagoi siellä zirkoniumin kanssa. [2] Samassa lämpötilassa zirkoniumin rakenne muuttuu muotoa, mikä mahdollistaa hapen sitoutumisen suojakuoreen sitä heikentävästi. Kun tämän yhdistää polttoainesauvan kaasuraon paineen kasvamiseen lämpötilan noustessa ja jäähdytteen paineen nopeaan laskemiseen, suojakuori saattaa pullistua ja murtua. Mikäli suojakuoren lämpötila nousisi yli 1200 °C:seen, suojakuoren ja veden välinen reaktio kasvaisi lämmöntuotannoltaan niin suureksi, että reaktio jatkuisi hallitsemattomana, jolloin syntyneen vedyn määrä voisi aiheuttaa vaaraa. Siksi turvallisuusvaatimuksissa on suojakuoren maksimilämpötilan lisäksi vaatimus onnettomuustilanteissa suojakuoreen syntyvän oksidikerrok-

sen laskennallisesta paksuudesta, mikä saa suurimmillaan olla 17 prosenttia suojakuoren ennen onnettomuustilannetta olleesta paksuudesta. [47, s. 50–51][51, s. 65–67]

Hätäjäähdytysjärjestelmistä paineakut alkavat purkautumaan ulospuhallusvaiheen aikana, mikäli suuressa LOCAssa oletetaan ulkoisen sähköverkon menetys. Muutoin korkea-paineinen hätäjäähdytysjärjestelmä käynnistyy myös ulospuhallusvaiheessa. Hätäjäähdytyksen vaikutus suojakuoren maksimilämpötilaan riippuu ulospuhallusvaiheessa höyryn ja veden virtauksesta sekä niiden jakautumisesta primääripiirissä. Ulospuhallusvaiheen loppupuolella voi tapahtua faasien erottumista sekä reaktorissa että primääripiirin eri osissa. Erityisesti alasmenotilassa (katso kuva 2.1), jossa jäähdyte normaalisti virtaa kylmistä haaroista reaktorin pohjalle, faasien erottuminen vaikuttaa siihen, kuinka paljon jäähdytettä virtaa ulos vuotokohdasta. Jos höyryä on paljon alasmenotilassa, se saattaa kuljettaa mukanaan hätäjäähdytysvettä vuotokohtaan, jolloin hätäjäähdytysvesi ei pääse reaktoriin asti. Höyry voi toisaalta reaktorin puolella kuljettaa mukanaan vesipisaroita, jotka parantavat polttoaineen jäähdytystä. Vesi voi päästä virtaamaan alas kohti reaktorin alatilaa, vaikka höyryvirtaus olisi ylöspäin. Tällöin kyseessä on veden ja höyryn vastavirtaus, johon vaikuttaa suuresti faasien välinen kitka ja virtausnopeudet. Höyryn virtausnopeudesta riippuu, kuinka paljon vettä pääsee virtaamaan alaspäin, ja tätä kutsutaan vastavirtauksen rajoitukseksi (CCFL, countercurrent flow limitation). Kun vuotovirtaus vähenee ja hätäjäähdytysvesi pääsee täyttämään reaktoripainesäiliön alatilaa, ulospuhallusvaihe päättyy. [9, s. 267–306]

3.2.2 Uudelleentäytyminen, uudelleentulvitus ja pitkäaikainen jäähdytys

Reaktoripainesäiliön pohjan, eli alatilan, uudelleentäyttymisen nopeuteen vaikuttaa veden massavirran suuruus alasmenotilasta. Kylmä hätäjäähdytysvesi törmää kuumaan ja jopa tulistettuun höyryyn aiheuttaen voimakasta lauhtumista. Kun höyryn määrä pienenee ja veden määrä kasvaa, CCFL-ilmiöstä aiheutuva veden ohivirtaus pienenee myös, jolloin enemmän vettä pääsee virtaamaan alatilaan. Höyryn lauhtuminen myös lämmittää hätäjäähdytysvettä, mikä pienentää rakenteisiin kohdistuvaa lämpöiskua. Toisaalta hätäjäähdytysvettä myös höyrystyy, koska primääripiirin rakenteet ovat hyvin kuumia. Yhtäaikainen lauhtuminen ja höyrystyminen voivat aiheuttaa paineen oskillointia ja toisaalta alatilan epätasaista täyttymistä. Alatilan täyttyminen on muutenkin hyvin epätasaista, sillä vuodon ollessa vain yhdessä pääkiertopiirissä, hätäjäähdytysveden lämpötila, höyryn osuus ja virtausjakaumat ovat hyvin epätasaisia. Kun vedenpinta reaktorissa nousee sydämen alatasolle, alkaa uudelleentulvitusvaihe. [9, s. 276–306]

Uudelleentulvituksessa vedenpinta nousee reaktorin sydämeen ja tunkeutuu polttoainesauvojen väliin. Vedenpinnan nousun nopeuteen vaikuttavat pitkälti samat ilmiöt kuin uudelleentäyttymisen nopeuteen. Kun vedenpinta reaktorissa alkaa nousta, nousee pinta

myös alasmenotilassa lähestyen kylmien haarojen korkeutta. Tällöin ehjistä pääkiertopiireistä voi kulkeutua höyryä vuotavaan piiriin ja höyryvirtaus voi kuljettaa mukanaan vesipisaroita. Tämä laskee pinnankorkeutta alasmenotilassa joka toisaalta hidastaa vedenpinnan nousua reaktorissa. Reaktorissa höyryvirtauksen mukana kulkeutuvat vesipisarot saattavat kulkeutua reaktoripainesäiliön ylätilaan (katso kuva 2.1) ja pidemmälle primääripiiriin. Ylätilaan kulkeutuva vesi voi kertyä esimerkiksi ylempään tukilevyyn (katso kuva 2.1) ja kulkeutua sieltä takaisin reaktoriin, mikä parantaa polttoaineen jäähdystystä. Toisaalta kulkeutuvat vesipisarot voivat höyrystyä, mikä aiheuttaa paineen nousua ylätilassa. Paineen nousu voi rajoittaa vedenpinnan nousemista reaktorissa ja siten hidastaa uudelleentulvitusta. Pinta ei välttämättä nouse samaa tahtia joka puolella reaktoria, sillä veden virtaus on tässäkin vaiheessa hyvin epätasaista. Reaktorin epätasainen tehojakautuma vaikuttaa myös polttoaineen ja suojakuoren lämpötilan kautta vedenpinnan nousuun. Uudelleentulvitusvaiheeseen liittyy polttoaineen jäähtymisen kannalta olennainen sammutusrintaman etenemisilmiö. [9, s. 272–291]

Kun vedenpinta reaktorissa nousee, vesi ei heti pääse koskettamaan suojakuoren pintaa sen kuumuuden takia. Tätä kutsutaan Leidenfrost-ilmiöksi. Kalvokiehuntaa ylläpitävää minimilämpötilaa kutsutaan myös ilmiön mukaisesti Leidenfrost-lämpötilaksi. [9, s. 426–428] Kun suojakuori saavuttaa jossakin pisteessä Leidenfrost-lämpötilan, vesi pääsee koskettamaan suojakuoren pintaa ja sammutusrintama on saavuttanut kyseisen korkeuden. Sammutusrintaman etenemiseen vaikuttaa hyvin paljon uudelleentulvituksen ilmiöt eli vedenpinnan nousu reaktorissa, vaikka vedenpinta nousee eri tahtia sammutusrintaman kanssa. Ennen sammutusrintaman etenemistä polttoaineesta lämpö siirtyy pois säteilemällä, vesipisaroita höyrystämällä ja suoralla konvektiolla höyryyn. Tätä vaihetta kutsutaan myös lämmönsiirtokriisin jälkeiseksi lämmönsiirroksi. Sammutusrintaman noustessa ylös lämmönsiirto muuttuu kuvan 3.1 mukaan osittaisen kalvokiehunnan ja kuplaliehunnan kautta konvektiiviseksi lämmönsiirroksi veteen. Lämmönsiirron parantuessa merkittävästi lämpötilagradientti sammutetun ja sammumattoman osan välillä voi olla hyvin suuri, mikä aiheuttaa lämmön johtumista suojakuoressa aksiaalisuunnassa. Tämä voi nopeuttaa sammutusrintaman etenemistä, sillä suojakuoren lämpötila saavuttaa nopeammin sammutuslämpötilan, joka vaaditaan polttoaineen uudelleen kastumiseen (rewet). Suuri lämpötilagradientti rasittaa suojakuorta, joten polttoaineen ja suojakuoren ominaisuuksia on syytä tarkastella myös sammutusrintaman edetessä. [9, s. 295–301]

Suojakuoren lämpötila nousee uudelleentäytymisen aikana ja saavuttaa huippunsa uudelleentulvituksen aikana. Suojakuoren pullistumiset ja murtumat saattavat haitata sammutusrintaman etenemistä, sillä ne voivat tukkivat veden virtausreitit. Kaksifaasivirtauksen aikana pullistuma voi myös parantaa jäähdystystä hajottamalla höyryn mukana kulkeutuvia vesipisaroita eri suuntiin ja pienemmiksi. Myös pullistuman jälkeen höyryvirtaus pienenee virtauspinta-alan laajentuessa, jolloin isoimmat vesipisarot eivät enää kulkeudu höyryn mukana vaan tippuvat alas jäähdyttäen polttoainetta. [51, s. 75]

Suojakuoreen sitoutunut happi heikentää suojakuoren taipuisuutta, mikä tekee siitä hauraamman. Kylmän hätäjähdytysveden aiheuttama lämpöisku voi hajottaa suojakuoren, mikäli suojakuoreen on sitoutunut liian paljon happea. Myös vetyä sitoutuu suojakuoreen, mikä heikentää suojakuoren kestävyttä. Vedyn aiheuttama suojakuoren haurastuminen on ongelma vasta suojakuoren lämpötilan laskiessa eli uudelleentulvitusvaiheen jälkeen. [51, s. 223–224] Tämä johtuu siitä, että lämpötilan laskiessa vedyn liukoisuus zirkoniumiin heikkenee, jolloin muodostuu zirkoniumhydridiä. Tämä voi saostua suojakuoreen ja heikentää sen taipuisuutta. [2, s. 51–52] Monia suojakuoren ilmiöitä ei kovin hyvin pystytä mallintamaan tai laskemaan, sillä niiden tutkiminen on haastavaa. Erityisesti zirkoniumin eri faasien vaikutus suojakuoren kestävyteen, paksun oksidikerroksen vaikutus eri ilmiöihin ja korkean lämpötilan lisäämä vedyn sitoutuminen suojakuoreen ovat asioita, joista ei ole riittävästi tutkimustietoa ja siitä syystä niitä ei ole erikseen huomioitu nykyisissä suojakuorta koskevissa turvallisuusvaatimuksissa. [47, s. 50–51][51, s. 224]

Kun sammutusrintama on edennyt sydämen yläosaan ja reaktori on veden peitossa, laitoksen täytyy useiden tuntien ajan huolehtia jälkilämmön poistamisesta eli pitkäaikaisesta jäähdytyksestä. Reaktorissa täytyy olla riittävästi vettä ja lämpö täytyy siirtää pois vettä kierrättämällä. Vuotava vesi kertyy suojarakennuksen lattiakaivoon eli sumppiin tai EPR:n tapauksessa hätäjähdytysvesialtaaseen. Täältä vuotovesi voidaan pumpata matalapaineisen hätäjähdytysjärjestelmän kautta takaisin reaktoriin. Ennen reaktoriin pääsyä vesi suodatetaan ja ajetaan lämmönvaihtimien kautta, joista lämpö siirretään esimerkiksi meriveteen. Tämä niin kutsuttu sumpkikierto käynnistyy PWR-laitoksella, kun paineakut ja tulvitusssäiliöt, mistä matalapaineinen hätäjähdytysjärjestelmä ottaa vetensä, ovat tyhjentyneet. EPR:n tapauksessa matalapaineinen hätäjähdytysjärjestelmä ottaa vetensä aina hätäjähdytysaltaasta. [34, s. 85, 338–339][52, s. 179]

3.3 Kokeellinen tutkimus

Jotta erilaisia ilmiöitä onnettomuus- tai häiriötilanteissa voitaisiin ymmärtää, tarvitaan kokeellista tutkimusta. Tutkimustulosten avulla voidaan kelpoistaa laskentakoodoja, joita hyödynnetään turvallisuusanalyysissä. Kokeellinen tutkimus on ollut merkittävä osa ydinvoiman ja ydinlaitosten turvallisuuden kehitystä jo 50-luvulta asti. Laskentakoodien kehitys kasvoi merkittävästi 70-luvulla, kun pystyttiin hyödyntämään tietokoneita turvallisuusanalyysissä. Tämä toi esiin myös tarpeen kokeelliselle tutkimukselle laajemmassa mittakaavassa, minkä takia käynnistettiin useita kansainvälisiä koeohjelmia. Tapahtuneet onnettomuudet korostivat tutkimuksen tarvetta, joten 70- ja 80-luvuilla rakennettiin paljon sekä erillisilmiö- että kokonaiskoelaitoksia. Nykyisin kokeellisella tutkimuksella pyritään vanhoja ja uusia laskentakoodoja kehittämällä parantamaan jo olemassa olevia turvallisuusvaatimuksia sekä kehittämään ydinvoimalaitoksia sekä komponenttitasolla että kokonaisuudessaan. [9, s. 54–58][52, s. 175–176]

3.3.1 Erillisilmiökokeet ja kokonaiskokeet

Erillisilmiökokeilla (Separate effect test) tutkitaan jonkin yksittäisen ilmiön vaikutusta rajattuun osaan laitosta. Erillisilmiökoelaitokset rakennetaan siten, että ne erikoistuvat yhden ilmiön tutkimiseen ja ilmiön paikallisten vaikutusten selvittämiseen. Kokonaiskokeilla (Integral effect test) tutkitaan jonkun laitostyyppin käyttäytymistä esimerkiksi onnettomuustilanteessa. Kokonaiskokeita tehdään kyseisen laitostyyppin mukaan rakennetuissa koelaitoksissa. Näissä koelaitoksissa on mallinnettu koko primääripiiri ja kaikki tärkeät komponentit sekä järjestelmät, jotka ovat oleellisia ydinvoimalan normaalitoiminnan ja onnettomuustilanteen kannalta. Komponentit on yleensä skaalattu pienemmiksi kuin todellisessa ydinvoimalassa, mikä täytyy huomioida kokeiden tuloksissa. Erillisilmiö- ja kokonaiskoelaitoksilla on pystytty tutkimaan monenlaisia ilmiöitä ja monenlaisten laitosten käyttäytymistä sekä normaaleissa käyttötilanteissa että häiriö- ja onnettomuustilanteissa. Yksi merkittävä kokonaiskoelaitos, jossa on tutkittu nimenomaan länsimaalaisen PWR:n käyttäytymistä onnettomuustilanteissa, on PKL-koelaitos [70, s. 1]. [9, s. 113–114]

PKL-koelaitos on ollut käytössä jo vuodesta 1977 alkaen ja laitosta on muokattu jatkuvasti uusiin kokeisiin. Laitoksen koeohjelmia on jatkettu kansainvälisten OECD:n koeohjelmien mukaisesti vuodesta 2001 alkaen. Koelaitos vastaa nykyään 1300 MW:n PWR-laitosta. Primääripiiri on mallinnettu kokonaan ja sekundääripiiri turbiinia ja lauhdutinta lukuun ottamatta. Kaikki korkeusasemat vastaavat mallina olleen Philippsburg 2 -laitosyksikön korkeusasemia, mutta tilavuudet on skaalattu suhteella 1:145 eli hydraulinen halkaisija komponenteissa on skaalattu suhteella 1:12. Kuumissa haaroissa tilavuutta ei ole skaalattu samalla tavalla, jotta CCFL:n vaikutusta voidaan mallintaa paremmin. [55, s. 4][70]

PKL-laitoksella tutkittiin alkuun suurta LOCAa, mutta TMI-2-onnettomuus keskeytti silloisen tutkimuksen. Tutkimus vaihtui pienempien vuotojen tapahtumasarjojen tutkimukseen ja laitoksella toistettiin TMI-2-onnettomuuden tapahtumat. Myöhemmin tutkimus on keskittynyt DBC-tilanteiden lisäksi erityisesti DEC-onnettomuuksiin. Esimerkiksi koelaitoksella on tutkittu pienessä LOCAssa tapahtuvaa boorin laimentumista OL3 -laitosyksikön turvallisuusanalyysijä varten [65]. Vuodesta 2020 alkaen PKL-laitoksella on tarkoitus tutkia myös uusien laitostyyppien passiivisia turvallisuusjärjestelmiä [55, s. 3]. Tutkimustuloksia on hyödynnetty useiden termohydrauliikkakoodien validoinnissa, ja tutkimukset ovat antaneet uutta tietoa eri reaktoriturvallisuuskysymyksistä. Tutkimustuloksista on ollut hyötyä myös käyttöhenkilökunnan koulutuksessa ja PKL-laitoksella on järjestetty käytännön koulutusta. Käyttöohjeiden ja erityisesti häiriötilanteiden ohjeita on pystytty verifioimaan PKL-kokeiden avulla. Myös muut koelaitokset, sekä kokonais- että erillisilmiökoelaitokset, ovat hyödyntäneet PKL-tutkimusten tuloksia. [70]

LOCAn ilmiöitä on tutkittu PKL-kokeiden lisäksi useilla eri koelaitoksilla. Ulospuhallusvaihetta on tutkittu jo pitkään sekä erillisilmiö- että kokonaiskokeilla. Esimerkiksi ennen TMI-2-onnettomuutta ulospuhallusvaiheen termohydraulisia ilmiöitä on tutkittu erillisilmiö-

kokeilla THTF-koelaitoksella (Thermal Hydraulic Test Facility). Kokeista on saatu dataa termohydrauliikkakoodien validointiin sekä polttoainesauvaa mallintavien sähköisten elementtien lämpötilaa mittaavien termoelementtien kehittämiseen ja kalibrointiin. [73] Samoja ilmiöitä on tutkittu kokonaiskokeilla LOFT-koelaitoksella (Loss-of-Fluid-Test) 80-luvulla. Kokeissa on saatu tietoa esimerkiksi ulospuhallusvaiheessa tapahtuvasta suojakuoren lämpötilan hetkellisestä laskemisesta, jota silloiset laskentakoodit eivät osanneet ennustaa. [43] Uudelleentäytymisvaihetta on tutkittu myös, sillä kyseisen vaiheen ilmiöille on haluttu kehittää laskentamalleja. Tarkastelun kohteena ovat olleet esimerkiksi alasmeno-tilan CCFL ja hätäjähdytysveden ohivirtaus vuotavaan pääkiertopiiriin. [48]

Tutkimusta tehdään nykypäivänäkin liittyen LOCA:n termohydraulisiin ilmiöihin, sillä nykyiset laskentakoodit ja koelaitteistot ovat kehittyneempiä. Näin saadaan tarkempia koetuloja ja tarkempaa validointidataa laskentakoodille. Uudelleentulitusvaiheen eri kiehumisvaiheita on tutkittu sekä erillisilmiö- että kokonaiskokeilla. Esimerkiksi höyryvirtauksen mukana kulkeutuvien vesipisaroiden vaikutusta lämmönsiirtoon on tutkittu paljon ja tällöin vesipisaroiden koon määrittäminen on tärkeää. RBHT-koelaitoksella (The Rod Bundle Heat Transfer) onkin erillisilmiökokeilla tutkittu esimerkiksi kuvankäsittelytekniikan hyödyntämistä pisaroiden koon määrittämisessä. [27] Myös vanhoilla koelaitoksilla tehtyjä tutkimuksia voidaan hyödyntää vielä nykyäänkin laskentakoodien validoinnissa. Esimerkiksi LOFT-koelaitoksilla tehtyjä LOCA-kokeita on hyödynnetty TRACE-termohydrauliikkakoodin sammutusrintaman laskennan kehityksessä. [49]

3.3.2 Tutkimus Suomessa

Suomessa tehdään paljon ydinturvallisuustutkimusta yliopistoissa ja tutkimuslaitoksissa. Tutkimusta rahoittavat sekä ydinvoimayhtiöt että valtio. Näitä tutkimuksia on erityisesti teetetty Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:llä. 80-luvun lopulla tutkimusta on alettu toteuttaa koordinoituna tutkimusohjelmina ja vuonna 2003 alkanee SAFIR-tutkimusohjelmat (The Finnish Research Programme on Nuclear Power Plant Safety) jatkuvat edelleen. [16, s. 6–8][38, s. 372–373] Painevesilaitoksiin liittyviä kokonaiskokeita on tehty erityisesti PACTEL-koelaitoksella (Parallel Channel Test Loop) Lappeenrannan-Lahden teknillisellä yliopistolla. Alkuperäinen PACTEL-laitos rakennettiin referenssinä Loviisan venäläiset VVER-tyyppiset (Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor) painevesireaktorit. Koelaitteistoa muokattiin myöhemmin niin, että se soveltuu PWR-tyyppisen reaktorin turvallisuustutkimukseen. Myöhemmin rakennetussa koelaitoksessa on tutkittu erityisesti EPR-tyyppisen OL3-laitosyksikön turvallisuutta. [37, s. 6]

PACTEL on lämpöteholtaan 1 MW:n koelaitos, jossa korkeusasemat ovat samat kuin referenssilaitoksessa. Tilavuudet on pääosin skaalattu suhteella 1:305. Kuumat ja kylmät haarat ovat noin puolet lyhempiä verrattuna referenssilaitokseen, jotta virtausilmiöitä pysyttäisiin mallintamaan paremmin. Lisäksi vaakasuuntaiset kolme höyrystintä on mitoi-

tettu siten, että ne vastaavat kukin kahta todellisen laitoksen höyrystintä. [69, s. 10–18] PWR PACTEL -koelaitoksen referenssinä on ollut OL3-laitosyksikkö. Koelaitteistossa on hyödynnetty alkuperäisen PACTELin komponentteja, kuten paineistinta ja reaktoripainesäiliötä. Korkeusasemia on skaalattu pienemmiksi höyrystimissä, mikä vaikuttaa myös tilavuuksien skaalaukseen. Höyrystimiä koelaitoksessa on kaksi, joista kumpikin vastaa yhtä EPR:n höyrystintä. Koelaitos mallintaa siis vain puolet EPR:n kapasiteetista, sillä EPR:ssä on neljä höyrystintä. [37, s. 6–13]

Molemmilla koelaitteistoilla on tehty LOCA-kokeita. Esimerkiksi PWR PACTEL -koelaitoksella on tutkittu primääripiirin luonnonkiertoa pienessä LOCAssa ja tuloksia on verrattu eri laskentakoodilla saatuihin tuloksiin. Tutkimuksesta saatiin lisää tietoa mallinnuksen haasteista sekä kokeellisten tulosten tulkitsemisesta. Tutkimustietoa voitiin hyödyntää myös laskentakoodien validoinnissa. [58] Molemmilla koelaitteistoilla on tutkittu myös lauhtumattomien kaasujen, kuten typen, vaikutusta primääripiirissä. Typeä voi vapautua primääripiiriin, mikäli paineakkujen tyhjennyttä vedestä virtausreittiä primääripiiriin ei suljeta täysin. Lauhtumattomat kaasut voivat kertyä primääripiirissä höyrystimiin heikentäen niiden lämmönsiirtoa ja kasvattaen primääripiirin painetta. Molempien kokeiden tapauksessa tarkasteltiin sitä, kuinka hyvin tässä työssä käytettävä laskentakoodi Apro pystyi ennustamaan lauhtumattomien kaasujen vaikutusta. [32] PACTEL -koelaitteistolla tehdyissä kokeissa tarkasteltiin myös Aproksen avulla sitä, onko koelaitteiston instrumentointi riittävä tarkasteltavana olevan ilmiön tutkimiseen. [35] PWR PACTEL -kokeet tulevat keskittymään yhä monimutkaisempiin ilmiöihin, kuten tässäkin työssä tarkasteltavaan paineistimen varoventtiilin ja höyryn ulospuhallusventtiilien yhtäaikaiseen avautumiseen tai reaktorin suojausjärjestelmien toiminnan verifiointiin. Kokeita tehdään yhdessä OECD:n PKL-4 projektin kanssa. [17, s. 62–63]

SAFIR-tutkimuksissa on hyödynnetty paljon myös muualla maailmalla tehtyä kokeellista tutkimusta, ja Suomi onkin vastavuoroisesti osallistunut kansainvälisiin tutkimusohjelmiin SAFIRin kautta. Erityisesti OECD:n tutkimusohjelmia on pystytty hyödyntämään esimerkiksi Aproksen validointiin. ROSA-ohjelman (Rig of Safety Assessment) LSTF-koelaitoksella (Large Scale Testing Facility) mallinnettua pienen vuodon onnettomuutta on esimerkiksi käytetty validointitapauksena [24]. Kuumen haaran pientä LOCAa, mitä on tutkittu PKL-koelaitoksella, on myös käytetty Aproksen validointiin [71]. Viime vuosina Aprosta on validoitu myös useiden uusien kokeiden perusteella, joista yksi esimerkki on ATLAS-koelaitoksella (Advanced Thermal-hydraulic test Loop for Accident Simulation) tehty keskikokoisen LOCAn koe [20]. Validoinnin lisäksi VTT:n osallistuminen tutkimusohjelmiin, missä toistetaan jokin koe usealla eri laskentakoodilla, on auttanut tuomaan esiin Aproksen ominaispiirteitä. Nykyään tekniikan kehittyminen, vanhojen laitoksien eliniänhallinta ja alati kehittyvät viranomaisvaatimukset edellyttävät yhä monimutkaisempia analyysejä, joissa koodien toimintaa ei ole aiemmin kokeiltu. Näin ollen tarvitaan kokeellista tutkimusta varmistamaan, että laskentakoodit laskevat oikein. [21]

4 JÄÄHDYTTEENMENETYSONNETTOMUUDEN MALLINTAMINEN

Deterministisiä turvallisuusanalyysyjä varten tarvitaan laskentamenetelmiä, joiden avulla pystytään tarkastelemaan häiriö- ja onnettomuustilanteiden vaikutusta polttoaineeseen, primääri- ja sekundääripiiriin sekä suojarakennukseen. Erityisesti LOCA-tapauksessa on tärkeä pystyä tarkastelemaan monimutkaisia termohydraulisia ilmiöitä ja turvallisuusjärjestelmien toimintaa kokonaisuutena [52, s. 173]. Tästä syystä laskennassa käytetään laajoja järjestelmäkokonaisuuksia mallintavia termohydrauliikkakoodeja, joista käytetään myös nimitystä systeemikoodi. Systeemikoodeilla pystytään mallintamaan kaikkia DBC-luokkien häiriö- ja onnettomuustilanteita sekä sellaisia DEC-tilanteita, joissa reaktorin sydämessä ei tapahdu muodonmuutoksia. [9, s. 641–642]

Systeemikoodeissa termohydrauliikan ratkaisu perustuu yleensä kuuden tasapainoyhtälön ratkaisemiseen, sillä sekä vedelle että höyrylle lasketaan omat tasapainoyhtälöt massan, liikemäärän ja energian säilymiselle [1, s. 183]. Nämä yhdistetään lämmönsiirto- ja neutronikinetiikkayhtälöiden kanssa, jotta voidaan kuvata reaktorin lämmöntuottoa ja lämmönsiirtoa kiinteissä rakenteissa. [50, s. 3] Kaikkia ilmiöitä ja komponentteja ei voida mallintaa näiden yhtälöiden avulla. Esimerkiksi kriittisen virtauksen, pääkiertopumpun tai höyrynerottimen laskentaan tarvitaan omia malleja, joiden avulla analyysitapauksen kannalta keskeiset ilmiöt saadaan kuvattua riittävällä tarkkuudella. [9, s. 596]

4.1 Ydinvoimalaitoksen mallinnus systeemikoodeilla

Systeemikoodien täytyy pystyä mallintamaan monenlaisia ilmiöitä, jotta ne kuvaisivat eri onnettomuustilanteita mahdollisimman hyvin. Termohydrauliikan lisäksi systeemikoodien täytyy pystyä mallintamaan erilaisten kaasujen ja boorin käyttäytymistä ja kulkeutumista, lämmön johtumista, neutronifysiikkaa, kemialla erityisesti zirkoniumin ja veden osalta, polttoaineen käyttäytymistä sekä erilaisia automaatiojärjestelmiä. [9, s. 643–644] Ydinvoimalaitoksen järjestelmät mallinnetaan systeemikoodeissa erilaisilla peruskomponenteilla, kuten esimerkiksi putkilla, tilavuuskomponenteilla sekä lämpörakenteilla. Hyvällä systeemikoodilla mallintaja pystyy suunnittelemaan analyysitapauksen kannalta järkevästi noodituksen ja määrittelemään sopivat laskenta-asetukset. [9, s. 649–650][50, s. 3–4]

Kaksifaasivirtauksen mallintaminen on kehittynyt vuosien saatossa. Ensimmäisissä systeemikoodeissa on käytetty homogeenistä tasapainotilamallia (HEM, Homogeneous Equilibrium Model), jossa oletetaan kaasun ja nesteen virtaavan homogeenisena seoksena [67, s. 126–127]. Tällöin tarvitaan vain kolme tasapainoyhtälöä, jotka ovat samat kuin yhden faasin virtauksen tapauksessa. Yksittäiselle faasille ominaiset suureet, kuten tiheys, määritellään painottamalla faasien tilavuusosuuksilla. Siinä missä HEM-malli olettaa nesteen ja kaasun virtausnopeuksien olevan yhtä suuria, *Drift-Flux* -malli pyrkii huomioimaan virtausnopeuksien eron kokeellisilla parametreilla. Tällöin tasapainoyhtälöiden määrä mallista riippuen on neljä tai viisi, sillä liikemäärän säilyminen voidaan kuvata yhdellä yhtälöllä [67, s. 127–128]. Mitä isompi määrä tasapainoyhtälöitä, sen enemmän tarvitaan yhtälöryhmän sulkevia yhtälöitä, jotka kuvaavat esimerkiksi faasien välistä vuorovaikutusta. [1, s. 180–183][50, s. 2–3]

Monet primääri- ja sekundääripiirin komponentit ovat tilavuudeltaan suuria tai geometria niissä on hyvin monimutkaista. Tästä syystä komponentteja nooditetaan eli jaetaan kontrollitilavuuksiin. Laskentanoodeihin on määritettävä, kuinka eri ilmiöitä mallinnetaan. Esimerkiksi termohydrauliikan ratkaisuun on olemassa 0D, 1D, 2D ja 3D -laskentamalleja. Putkivirtaukset systeemikoodeissa mallinnetaan yleensä 1D-yhtälöillä laskentanoodeissa, sillä ne kuvaavat riittävällä tarkkuudella kaksifaasivirtausta. Tällä tavoin monimutkaisesta prosessimallista ei tule laskennan kannalta liian raskas. Toisaalta jotkin ilmiöt ovat niin riippuvaisia kolmiulotteisesta virtauskentästä, että niiden mallintamiseen tarvitaan 3D-yhtälöitä laskentanoodeissa. [9, s. 649–651]

Vaikka monia eri ilmiöitä ja komponentteja pystytään mallintamaan hyvinkin tarkasti, systeemikoodeissa on tehtävä yksinkertaistuksia. Monimutkaisempi malli pidentää laskenta-aikaa, joten koodin käyttäjä joutuu tasapainoilemaan järkevän laskenta-ajan ja tulosten tarkkuuden välillä. Tästä syystä joillekin komponenteille, kuten pumpuille ja venttiileille, tai ilmiöille, kuten kriittiselle virtaukselle ja painehäviöille, tarvitaan omia empiirisiä malleja kuvaamaan niiden toimintaa tai vaikutusta järjestelmissä. Näitä komponentteja ja ilmiöitä ei pystytä mallintamaan yksiulotteisilla tasapainoyhtälöillä useasta syystä. Komponentin geometria voi olla monimutkainen tai vaikutuksia on kuvattava ylimääräisillä lähde- ja nielutermeillä. Esimerkiksi putkikatkot voivat aiheuttaa hyvin moniulotteisia ilmiöitä. Empiiriset yhtälöt ovat usein määritetty vertailemalla erillisilmiökokeiden tuloksia laskentakoodien tuloksiin. [9, s. 652–656][50, s. 4]

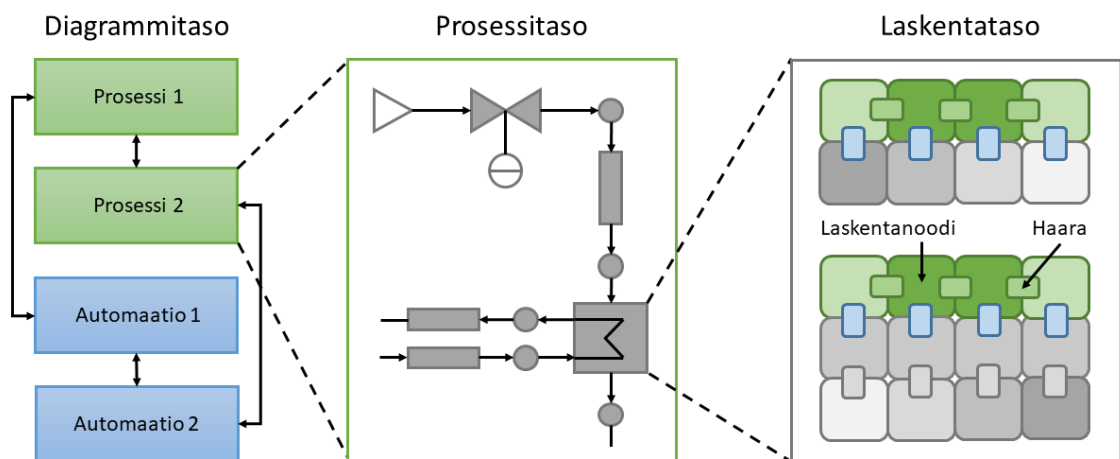
Systeemikoodin yhtälöryhmän ratkaisemiseen tarvitaan numeerisia menetelmiä. Yhtälöt täytyy ensin keskiarvottaa ajan ja tilan suhteen. Näin oletetaan eri suureiden pysyvän vakioina tarkasteltavassa tilavuudessa ja aika-askeleessa. Jotta yhtälöistä saadaan lineaarinen ratkaistavissa oleva yhtälöryhmä, täytyy yhtälöt muuttaa vielä diskreeteiksi tilan ja ajan suhteen. Yhden aika-askeleen tulokset lineaarisesta yhtälöryhmästä ratkaistaan iteratiivisilla menetelmillä. Systeemikoodeilla on monia vaatimuksia, mitä tulee numeerisiin menetelmiin. Laskenta-ajan täytyy pysyä järkevässä arvossa suhteessa analyysita-

paukseen, mutta laskennasta täytyy saada riittävän tarkkoja tuloksia. Erityisesti massan ja energian säilyminen täytyy pystyä määrittämään riittävällä tarkkuudella, sillä laitoksen suojaustoimintojen aktivoituminen perustuu monesti lämpötilaan tai massavirtaan. Laskentatarkkuus vaikuttaa siten olennaisesti analyysin kulkuun. [9, s. 659–663]

Mikäli esimerkiksi jotakin komponenttia tai polttoaineen käyttäytymistä halutaan mallintaa tarkemmin, voidaan systeemikoodiin yhdistää muita laskentakoodia. Yhdistettäviä koodia voivat olla esimerkiksi reaktorifysiikkaan erikoistuvat koodit, virtauslaskentakoodit tai suojarakennuksen käyttäytymistä kuvaavat koodit. Näiden käyttöön liittyy useita etuja laskennan kannalta. Laskenta-aika pysyy järkevänä, kun kaikkea ei tarvitse sisällyttää systeemikoodiin. Tämä johtuu siitä, että tiedonvaihto tapahtuu koodien rajapinnassa automaattisesti ja jatkuvasti. Yhdistettävien laskentakoodien avulla voidaan parantaa laskentatuloksien tarkkuutta ja lisätä uusia analyysitapauksia ilman, että systeemikoodia tarvitsisi kehittää sopivaksi kaikkien ilmiöiden laskemiseen. [9, s. 667–670][50, s. 13–15]

4.2 Mallinnus Apros-ohjelmistolla

Apros on simulaatio-ohjelmisto, jolla voi mallintaa sekä virtausprosesseja että automaatio- ja sähköjärjestelmiä. Apros soveltuu niin polttovoimalaitoksien kuin ydinvoimalaitoksien mallinnukseen ja sitä käytetään esimerkiksi prosessi- ja automaatio suunnittelussa, turvallisuusanalyysissä, tutkimuksen apuna ja operaattoreiden koulutukseen simulaattoreissa. Kaksifaasivirtausta on mahdollista mallintaa yksiuotteisesti kolmen, viiden tai kuuden yhtälön mallilla. [3][53, s. 2] Kuvassa 4.1 on esitelty Apros-mallin rakenne.



Kuva 4.1. Apros-mallin rakenne eri tasoilla, muokattu lähteestä [3].

Eri järjestelmiä tai niiden osia mallinnetaan omille diagrammeille, joihin käyttäjä rakentaa eri komponenteista, kuten venttiileistä, putkista ja lämmönvaihtimista, halutun järjestelmän tai sen osan. Diagrammit ovat siis tapa jakaa mallinnettava järjestelmä hallittavaksi kokonaisuudeksi, ja eri diagrammeilla sijaitsevia komponentteja on mahdollista yhdistää toisiinsa. Käyttäjän lisäämät prosessitason komponentit muodostavat automaattisesti

laskentatason noodit ja rakenteet. Laskenta-asetusten muokkaaminen tapahtuu yleensä muuttamalla prosessitason komponentin parametreja, jolloin muokkaukset siirtyvät vastaavasti laskentatasolle. Tarvittaessa myös laskentatason komponentteja voi muokata suoraan. Aproksen virtauslaskenta tapahtuu laskentanooodeissa eli kontrollitilavuuksissa ja niitä yhdistävissä haaroissa. [3]

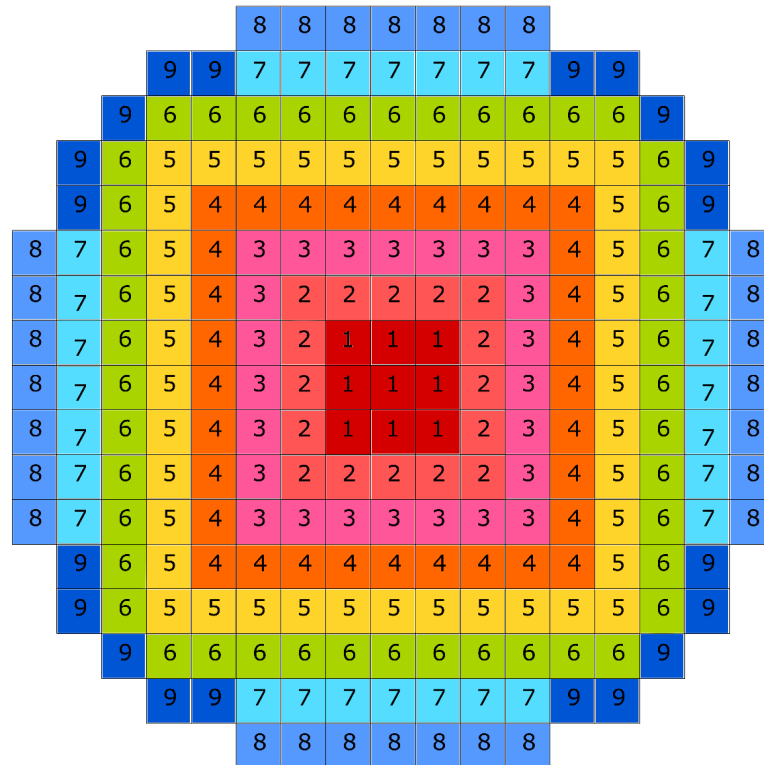
4.2.1 Olkiluoto 3 -laitosyksikön Apro-malli

Apros-mallin kehittäminen OL3-laitosyksikölle on aloitettu vuonna 2005. Teollisuuden Voima Oyj (TVO) on halunnut varmentaa laitostoimittajan prosessi- ja turvallisuussuunnittelua omilla, laitostoimittajasta riippumattomilla analyyseillä ja kehittää samalla monikäyttöisen laitostason simulointimallin. Laitosmallia on validoitu esimerkiksi suuren ja pienen LOCAn tapauksilla vertailemalla tuloksia laitostoimittajan laskemiin analyyseihin. Tulevaisuudessa laitosmallia on tarkoitus käyttää sekä turvallisuusanalyyseissä että prosessimallinnuksessa. [53]

OL3 -laitosyksikön Apro-mallissa on mallinnettu sekä primääri- että sekundääripiiri. Primääripiirissä on mallinnettu kaikki neljä pääkiertopiiriä, reaktoripainesäiliö, paineistin, hätäjäähdytys- ja jälkilämmönpoistojärjestelmät sekä jäähdytteen käsittelyyn tarkoitetut järjestelmät. Sekundääripiirissä on mallinnettu höyrystimet, turbiinit, lauhdutin, syöttövesipumput, esilämmittimet ja putkilinjat. Sekundääripiiriin kuuluvat turvallisuusjärjestelmät, kuten turbiinin ohitusventtiilit, höyryn ulospuhallusventtiilit ja hätäsyöttövesipumput on mallinnettu. Automaatio- ja sähköjärjestelmistä on mallinnettu turvallisuus- ja käyttötoimintojen kannalta tärkeimmät järjestelmät. [53, s. 3–4]

Laitosmallista on tehty kolme eri käyttötarkoituksiin soveltuvaa versiota, jotka eroavat toisistaan reaktorimallin suhteen. Ensimmäisessä, lähinnä prosessisimulointeihin soveltuvassa 1D-mallissa reaktori on mallinnettu yhtenä virtauskanavana, jonka 20 aksiaaliodissa lasketaan termohydrauliikka ja neutroniikka. [53, s. 4] Myöhemmin reaktorianalyysiä varten rakennetussa 3D-mallissa jokainen reaktorin polttoaine-elementti on mallinnettu erikseen. Tällöin pystytään tarkastelemaan huomattavasti tarkemmin reaktorin käyttäytymistä ja esimerkiksi mallintamaan säätösauvojen toiminta ja vaikutus reaktorin tehoon. [28] Tässä työssä tarkasteltavassa monikanavamallissa reaktorin polttoaine-elementit on jaettu yhdeksään sisäkkäiseen laskentakanavaan kuvan 4.2 mukaisesti.

Polttoaine-elementtien jako kanaviin on tehty elementtien tehon perusteella siten, että kuumimmat elementit on sijoitettu keskelle ja kylmimmät kanavaan 8 [53, s. 9]. Tällöin kuumaan sauvaan keskelle reaktoria, missä tehotiheys on suurin, saadaan laskettua todellista suurempi suojakuoren maksimilämpötila [40, s. 393–394]. LOCAn mallinnukseen vaaditaan 1D-mallia tarkempi reaktorimalli, jotta reaktorisydämen virtauskenttä, huomioiden myös ristivirtaukset, voitaisiin mallintaa. Ristivirtausten mallintaminen on tärkeää, sillä EPR:n tapauksessa polttoaine-elementtien ympärillä ei ole suojaavaa kanavaa, jo-



Kuva 4.2. Reaktorisydämen polttoaine-elementtien jako yhdeksään sisäkkäiseen kanaavaan monikanavamallissa [36, s. 4].

ten virtaus pääsee kulkemaan elementistä toiseen [33, s. 59]. Kuitenkin 3D-malli voi olla turhan raskas suuren laskentanoodimäärän takia, vaikka ristivirtauksia ei otettaisi huomioon. [31, s. 3–17] Sijoittamalla useampia polttoaine-elementtejä samaan laskentakanavaan saadaan laskenta-aikaa pienemmäksi ja toisaalta edustavia tuloksia LOCAn ilmiöistä. [29]

Monikanavamallissa yksi kanava on mallinnettu siihen tarkoitetun termohydrauliikkakanavaa mallintavan moduulin avulla, joka luo tarvittavat laskentatason noodit. Yksi kanava mallintaa keskiarvopolttoainesauvaa, jossa kanavan polttoaine-elementtien tuottama teho on keskiarvoistettu yhdelle sauvalle, ja kanava on jaettu pituussuunnassa 40 termohydrauliikkanoodiin. Yksi tällainen noodi on kytketty 20 lämpörakenteeseen aksiaalisuunnassa, jolloin yhden lämpörakenteen korkeudeksi tulee 5,25 mm. Tiheä lämpörakennejako mahdollistaa tarkemman mallinnuksen sammutusrintaman etenemisestä. Radiaalisuunnassa lämpörakenteita on kymmenen yhdessä termohydrauliikkanoodissa, jotta voidaan laskea lämmön johtuminen radiaalisuunnassa [56, s. 30]. Keskimmäisessä kanavassa eli kuvan 4.2 kanavassa 1 on mallinnettu myös kuumin polttoainesauva, jolloin lämpörakenteiden määrä on kaksinkertainen verrattuna muihin kanaviin. [36, s. 3]

Neutroniikkaa tässä monikanavamallissa ei ratkaista ollenkaan, vaan reaktorin suhteellinen teho annetaan reunaehtona mallille. Jokaiselle kanavalle ja kuumalle sauvalle erik-

seen on määritetty nimellisteho. Todellinen tuotettu lämpöteho määräytyy tämän ja reaktorin suhteellisen tehon tulona. Näin saadaan pienennettyä laskenta-aikaa suuresta lämpörakennemäärästä huolimatta. [36, s. 3–11]

4.2.2 Laitosmallin kaksifaasimallinnus

Laitosyksikön prosessin kaksifaasimallinnukseen on käytetty kuusiyhtälömallia. Kuusiyhtälömallilla saadaan tarkempia tuloksia verrattuna muihin kaksifaasimalleihin [1, s. 183]. Kuusiyhtälömallissa ratkaistaan massan, liikemäärän ja energian säilyminen sekä kaasuetta nestefaasille erikseen. Massan säilyminen on mallinnettu yhtälöllä

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \frac{\partial}{\partial z}(\alpha_k \rho_k u_k) = \Gamma_k, \quad (4.1)$$

jossa t on aika, α on tilavuusosuus, ρ on tiheys, z on paikkakoordinaatti, u on virtausnopeus ja Γ on massan siirtymisnopeus. Alaindeksi k viittaa tarkasteltavaan faasiin [39, s. 9] Yhtälön ensimmäinen termi kuvaa massan muutosta kontrollitilavuudessa ajan suhteen ja toinen termi massan muutosta kontrollitilavuudesta kulkeutumisen takia. Massan siirtymisnopeudella tarkoitetaan massan lisäystä tai häviötä faasimuutoksesta johtuen. [67, s. 148]

Liikemäärän säilyminen on kuvattu laitosmallissa seuraavasti:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k u_k \rho_k) + \frac{\partial}{\partial z}(\alpha_k \rho_k u_k^2) = -\alpha_k \frac{\partial p}{\partial z} + \Gamma_k u_{i,k} + \alpha_k \rho_k g + F_{w,k} + F_{i,k}. \quad (4.2)$$

Yhtälössä p on paine, g on putoamiskiihtyvyyden ja F on vastusvoima. Alaindekseissä w viittaa faasin ja seinän välisiin voimiin ja i faasien välisiin voimiin. [39, s. 9] Yhtälön kaksi ensimmäistä termiä kuvaavat vastaavia asioita liikemäärälle kuin massan säilymisyhtälön vastaavat termit. Yhtäsuuruusmerkin toisella puolella ensimmäinen termi kuvaa paineen vaikutusta liikemäärään, toinen termi faasimuutoksen, kolmas termi painovoiman ja kaksi viimeistä termiä kiinteiden rakenteiden ja virtaavan fluidin välisten jännitysten sekä faasien välisten jännitysten vaikutusta liikemäärään. [67, s. 152–153]

Käytännössä liikemäärän säilymisyhtälön termit näkyvät mallintajalle erilaisina painehäviöinä. Mikäli virtauksen oletetaan olevan vakio, aikariippuvainen termi ja faasimuutosta kuvaava termi häviävät yhtälöstä 4.8. Siirtämällä paineen muutosta kuvaava termi yhtälön vasemmalle puolelle ja loput oikealle, saadaan kuvattua kokonaispainehäviö virtausmatkan suhteen. Painehäviötä tällöin aiheuttavat virtauksen kiihtyvyyden, painovoiman eli korkeuseron, virtauksen ja seinämän välinen kitka sekä faasien välinen kitka. [1, s. 178–180][9, s. 496]

Energian säilyminen on kuvattu kuusiyhtälömallissa yhtälöllä

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_k \alpha_k \left(h_k + \frac{u_k^2}{2} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_k \alpha_k \left(h_k + \frac{u_k^2}{2} \right) u_k \right) = \alpha_k \frac{\partial p}{\partial t} + \Gamma_k \left(h_{i,k} + u_{i,k} u_k - \frac{u_k^2}{2} \right) + Q_{i,k}''' + Q_{w,k}''' + F_{i,k} u_{i,k} + \alpha_k \rho_k u_k g, \quad (4.3)$$

jossa h on entalpia ja Q''' on lämpövirta. [39, s. 9] Kaksi ensimmäistä termiä kuvaavat ajan suhteen energian muutosta ja kulkeutumisen kautta tapahtuvaa muutosta kontrolli-tilavuuden energiassa. Yhtälön toisella puolella ensimmäinen termi kuvaa paineen tekemää työtä tilavuuteen, toinen faasimuutoksen, toiseksi viimeinen faasien välisten jännitysten ja viimeinen painovoiman tekemää työtä kontrolli-tilavuuteen. Lämpövirtatermeistä ensimmäinen kuvaa lämpövirtaa faasien välillä ja toinen faasin ja kiinteän pinnan välillä. [67, s. 158–161]

4.3 Onnettomuuden ilmiöiden mallintaminen

LOCAn erilaisten ilmiöiden mallintaminen perustuu pitkälti empiirisiin korrelaatioihin. Näillä pystytään mallintamaan monimutkaisia ilmiöitä käytännön analyysityön kannalta kohtuullisella laskenta-ajalla. Tässä luvussa käsitellään onnettomuuden kannalta oleellisia ilmiöitä, joita ovat kriittinen virtaus, CCFL-ilmiö, lämmön johtuminen ja konvektiivinen lämmönsiirto eri kiehun vaiheissa. Korrelaatioista esitellään ne, jotka ovat käytössä OL3-laitosyksikön Apros-mallissa.

4.3.1 Kriittinen virtaus

Kriittinen virtaus voi syntyä sekä yksi- että kaksifaasiolosuhteissa. Putkivuotojen lisäksi virtaus voi mennä kriittiseksi esimerkiksi ulospuhallusventtiileissä, minkä takia ilmiön mallintaminen on erityisen tärkeää. Yhden faasin virtauksessa yhtälö maksimivirtausnopeudelle saadaan johdettua massan ja liikemäärän tasapainoyhtälöistä, jolloin tulos on sama kuin äänennopeus kyseisessä väliaineessa. Tämä pätee vain isentrooppisissa olosuhteissa. Kaksifaasivirtaukseen on hankala soveltaa samaa periaatetta, minkä takia kriittisen virtauksen määrittämiseen on kehitetty useita eri korrelaatioita. Yleisimpiä näistä ovat HEM-malli ja Moodyn malli. [1, s. 189][67, s. 507–510]

HEM-mallissa oletetaan faasien nopeuksien ja lämpötilojen olevan yhtä suuria, kun taas Moodyn mallissa oletetaan vain termodynaaminen tasapaino. Molempien mallien tapauksessa kriittinen massavirta pinta-alaa kohti eli massavuo voidaan laskea yhtälöllä

$$G^2 = \frac{2(h_0 - (1-x)h_l - xh_g)}{(S(1-x)v_l + xv_g)^2 \left(x + \frac{1-x}{S^2} \right)}, \quad (4.4)$$

missä G on massavuo, x on höyrynpitoisuus virtauksessa termodynaamisessa tasapainossa ja v on ominaistilavuus. Alaindeksit g ja l viittaavat kaasu- ja nestefaasiin, ja h_0 on virtauksen entalpia ylävirrassa eli esimerkiksi putkessa ennen vuotokohtaa. Mikäli oletetaan myös isentrooppinen paisunta, höyrynpitoisuus virtauksessa voidaan määrittää yhtälöllä

$$x = \frac{s_0 - s_l}{s_g - s_l}, \quad (4.5)$$

missä s on entropia ja s_0 on entropia perustilassa. Yhtälössä 4.1 S kuvaa faasien nopeuksien suhdetta eli liukusuhdetta. Koska HEM-mallissa faasien nopeudet ovat yhtä suuria, S saa arvon 1. Moodyn mallissa tämä suhdeluku ilmoitetaan faasien tiheyksien tai ominaistilavuuksien avulla seuraavasti:

$$S = \frac{u_g}{u_l} = \left(\frac{v_g}{v_l} \right)^{1/3}. \quad (4.6)$$

Kriittiselle virtaukselle on muitakin korrelaatioita eri käyttötarkoituksiin. Esimerkiksi mikäli laskennassa oletetaan, että virtaus ei ole termodynaamisessa tasapainossa, tarvitaan erilaisia korrelaatioita. [9, s. 599–600][67, s. 509–512]

Laitosmallissa LOCAn tapauksessa kriittinen virtaus vuotokohdassa lasketaan Moodyn mallilla eli yhtälön 4.1 mukaisesti, kun kyseessä on kaksifaasivirtaus. Yhden faasin virtauksessa oletetaan höyry ideaalikaasuksi ja isentrooppinen paisunta. Sekä yhden että kahden faasin yhtälöillä lasketaan kriittinen massavuo ja näistä suurempaa käytetään laskennassa. Suurin arvo määritetään polynomisovituksen avulla. [39, s. 63–65]

4.3.2 CCFL-ilmiö

CCFL-ilmiö on tärkeä mallintaa hyvin, sillä se vaikuttaa hätäjähdytysveden pääsemiseen reaktoriin LOCAn ulospuhallus- ja uudelleentäyttövaiheissa. Ilmiötä on tutkittu paljon kokeellisesti, minkä takia CCFL:n laskentaan on olemassa empiirisiä korrelaatioita, joiden avulla voidaan määrittää reaktoriin pääsevän hätäjähdytysvirtauksen suuruus. Tällaisia ovat esimerkiksi Wallisin ja Kutateladzen korrelaatiot. [9, s. 602–603]

Wallisin korrelaatio on alun perin kehitetty pienille putkille, mutta myöhemmin on todettu sen soveltuvan myös isommille putkille. Kutateladzen korrelaatio on taas kehitetty isoille putkille. Korrelaatioissa määritellään kaasulle ja nesteelle dimensiottomat luvut, jotka ovat nimetty korrelaatioiden mukaan. Kutateladzen luku voidaan määrittää seuraavasti:

$$K_k = j_k \left(\frac{\rho_k^2}{\sigma g \Delta \rho} \right)^{1/4}. \quad (4.7)$$

Yhtälössä K on Kutateladzen luku, j on virtauksen näennäisnopeus ja σ on pintajännitys. Näennäisnopeus määritellään faasin nopeuden ja tilavuusosuuden tulona [67, s. 140].

Wallisin luvussa pituuskaalana on käytetty kaasu- tai nestekuplan halkaisijaa, kun taas Kutateladzen luvussa on käytetty Laplacen vakiota, joka perustuu pintajännitykseen. Kutateladzen luku kuvaa faasin inertiaivoimien suhdetta painovoimaan. CCFL-ilmiötä kuvaava korrelaatio on esitetty dimensiottoman luvun avulla yhtälöllä

$$K_g^{1/2} + C_1 K_l^{1/2} = C_2, \quad (4.8)$$

missä C_1 ja C_2 ovat vakioita, jotka riippuvat putken tai komponentin geometriasta. Vakioiden arvoja on määritetty sekä erillisilmiö- että kokonaiskokeista saatujen tulosten perusteella. [9, s. 603–604][67, s. 466–467]

CCFL-ilmiö reaktorin alasmenotilassa ja sydämen ylätukilevyssä on mallinnettu laitosmallissa hyödyntämällä yhtälöitä 4.4 ja 4.5. Yhtälön 4.5 vakioille on taulukon 4.1 mukaiset korrelaatiot. [39, s. 30–31]

Taulukko 4.1. CCFL-korrelaation vakiot laitosmallissa [39, s. 30–31].

alasmenotila	$C_1 = 0,011 \left(\frac{v_g^{2/3}}{\rho_g^{2/3} g^{1/3} l} \right)^{-1/2}$	$C_2 = 0,024 \left(\frac{v_g^{2/3}}{\rho_g^{2/3} g^{1/3} l} \right)^{-1/2}$
sydämen ylätukilevy	$C_1 = 0,014 \left(\frac{v_g^{2/3}}{\rho_g^{1/3} g^{1/3} l} \right)^{-1/2}$	$C_2 = 0,027 \left(\frac{v_g^{2/3}}{\rho_g^{1/3} g^{1/3} l} \right)^{-1/2}$

Taulukon 4.1 yhtälöissä l kuvaa alasmenotilassa vuotavan kylmän haaran ja sen kylmän haaran välistä etäisyyttä, johon hätäjähdytysvettä syötetään. Ylätukilevyn tapauksessa pituus on määritelty vuotavan kuuman haaran ja hätäjähdytysvettä syöttävän kuuman haaran välisenä etäisyytenä. Kyseisen parametri on määritelty seuraavasti:

$$l = 0,5\pi d_{out} \sin^2(0,5\theta_{ECC-BCL}), \quad (4.9)$$

$$l = d_e \sin(0,5\theta_{ECC-BHL}). \quad (4.10)$$

Yhtälöissä d_{out} on alasmenotilan ulkohalkaisija, $\theta_{ECC-BCL}$ on hätäjähdytysyöttöhaaran ja rikkoutuneen kylmän haaran välinen kulma, d_e on karakteristinen halkaisija ja $\theta_{ECC-BHL}$ on hätäjähdytysyöttöhaaran ja rikkoutuneen kuuman haaran välinen kulma. Aproxsessä karakteristisena halkaisijana on käytetty ylätukilevyn halkaisijaa. Vakioi-

den C_1 ja C_2 avulla ratkaistaan faasien väliset vastusvoimat yhtälöllä

$$F_i = \frac{\sqrt{\frac{g(\rho_l - \rho_g)}{\sigma}} (\sqrt{\rho_g} + C_1^2(1 - \alpha)\sqrt{\rho_l})^2 \alpha(1 - \alpha)}{C_2^4}. \quad (4.11)$$

Vastusvoima määrittää sen, kuinka paljon vastaan virtaava höyryvirtaus estää hätäjähdytysveden virtausta. [39, s. 31]

4.3.3 Lämmönsiirto

Lämmönsiirto polttoaineessa ja polttoaineesta jäähdytteeseen määrää polttoaineen suo- jakuoren maksimilämpötilan, joten ilmiö on mallinnettava tarkasti. Lämmön johtumiseen polttoaineessa vaikuttaa hyvin paljon materiaalien eli uraanioksidin, heliumtäytteen kaa- suraon ja zirkonium-seoksen lämmönjohtavuus. Erityisesti uraanioksidin eli uraanidioksi- dia olevan polttoainepelletin lämmönjohtavuudelle on useita eri korrelaatioita, sillä läm- mönjohtavuuteen vaikuttavat esimerkiksi lämpötila, huokoisuus ja polttoaineen koostu- mus. [1, s. 255, 263–266][67, s. 297–305]

Polttoaineesta jäähdytteeseen tapahtuvassa lämmönsiirrossa on oleellista määrittää kie- hunnan vaihe ja siihen sopiva lämmönsiirtokorrelaatio. Kiehunnan vaiheen määrittämi- seen on monia tapoja ja siihen vaikuttavat esimerkiksi massavirta, höyrypitoisuus ja läm- pövuoto. [1, s. 317–322][67, s. 525–542] Laitosmallissa on käytössä kolme eri kiehunnan vaihetta: ei kiehunnaa sekä kuplakiehunna, osittainen kalvokiehunna, ja kalvokiehunna. Ku- vassa 3.1 vastaavat vaiheet ovat pisteiden A ja C välillä, pisteiden C ja D välillä sekä pis- teestä D eteenpäin. Kiehunnan vaiheen valintaan vaikuttavat suo- jakuoren lämpötila, jääh- dytteen lämpötila, saturaatiolämpötila ja höyryn osuus. Valinnassa hyödynnetään myös kriittistä lämpövuotoa ja kalvokiehunnaa ylläpitävää lämpötilaa. [39, s. 32]

Jotta voidaan määrittää lämmönsiirtokriisiin ajanhetki, kriittinen lämpövuoto täytyy pystyä määrittelemään. Kriittisen lämpövuo- ton määrittämiseen on useita kokeellisia korrelaatioita sekä PWR- että BWR-tyyppisille polttoaine- elementeille. Kriittinen lämpövuoto on riippu- vainen virtauspinta- alasta, pituudesta, jossa kiehunnaa esiintyy, sekä jäähdytteen mas- savuosta, paineesta ja höyryosuudesta. Aproxsessä on valmiina useita eri korrelaatioita kriittisen lämpövuo- ton määrittämiseen ja käyttäjä voi halutessaan lisätä malliinsa esimer- kiksi polttoainevalmistajan ilmoittaman korrelaation. [39, s. 33]. [1, s. 334–339]

Aproxsessä siirtyminen kalvokiehunna- n alueelle riippuu Leidenfrost-lämpötilasta silloin, kun polttoaine ei ole täysin höyryn ympäröimä. Tämä lämpötila on määritetty laitosmallis- sa Stewartin ja Groeneveldin korrelaatiolla [39, s. 42]:

$$T_{min} = 284,7 + 4,41 \cdot 10^{-5}p - 3,72 \cdot 10^{-12}p^2 + \frac{(h_{l,sat} - h_l) \cdot 10^4}{h_{fg}(2,82 + 1,22 \cdot 10^{-6}p)}. \quad (4.12)$$

Yhtälössä T on lämpötila (K) ja h_{fg} on latenttilämpö eli faasin muutokseen tarvittava entalpiamuutos. Paine kuvaa tässä jäädytteen painetta. Kalvokiehuntaa ylläpitävän lämpötilan määrittämiseen on useita muitakin korrelaatioita eri käyttötarkoituksiin sekä erilaisiin oletuksiin perustuen [67, s. 527–528]. [9, s. 610–613]

Lämmönsiirto kalvokiehunnan vaiheessa määritetään laitosmallissa kolmesta eri lämmönsiirtokertoimen korrelaatiosta. Korrelaatiot on määritetty erikseen allaskiehumiselle, pakotetulle konvektiolle ja luonnolliselle konvektiolle. Allaskiehumisessa lämmönsiirtokerroin on laitosmallissa määritetty Berensonin korrelaatiolla seuraavasti:

$$H_1 = 0,425 \left(\frac{\lambda_g^3 \rho_g g^{2/3} (\rho_l - \rho_g)^{3/2} (h_{sat,s} - h_{sat,l})}{\mu_g |T_w - T_g| \sqrt{\sigma}} \right)^{1/4} \cdot \sqrt{1 - \alpha} (1 + 0,025 \max(T_{sat} - T_l; 0)). \quad (4.13)$$

Yhtälössä H on lämmönsiirtokerroin, λ on lämmönjohtumiskerroin ja μ on viskositeetti. Groeneveld on myöhemmin lisännyt korrelaatioon kaksi viimeistä termiä, jotta se huomioisi paremmin höyryn osuuden sekä alijäähtymisen vaikutukset. [5, s. 242][39, s. 46]

Pakotettu ja luonnollinen konvektio kalvokiehuntavaiheessa on laskettu laitosmallissa seuraavilla yhtälöillä:

$$H_2 = \frac{\max(Nu_g; 3, 66) \lambda_g}{D_{h,g}}, \quad (4.14)$$

$$H_3 = \frac{\lambda_g}{D_{h,g}} \max(0, 401 Gr_g^{1/4} Pr_g^{1/4}; 0, 12 Gr_g^{1/3} Pr_g^{1/3}). \quad (4.15)$$

Ylemmässä yhtälössä Nu on Dittus-Boelterin korrelaatiolla määritetty Nusseltin luku ja D_h on hydraulinen halkaisija höyrykalvolle. Alemmassa yhtälössä Gr on Grashofin luku ja Pr on Prandtin luku. Lämpövuoto suojakuoresta jäädytteeseen lasketaan valitsemalla suurin lämmönsiirtokertoimen arvo yllä olevista kolmesta yhtälöstä. [39, s. 46–47]

LOCAn uudelleentulvitusvaiheessa sammutusrintaman korkeuden määrää suojakuoren lämpötila ja virtauksen ominaisuudet. Kun suojakuoren lämpötila laskee alle Leidenfrost-lämpötilan, nestemäinen jäädyte pääsee koskettamaan suojakuoren pintaa. Kiehunta siirtyy tällöin kuplakiehuntaan. [9, s. 610–613] Aproxessa kiehunna palaa tähän vaiheeseen vasta sitten, kun suojakuoren lämpötila laskee alle saturaatiolämpötilan [39, s. 32].

Uudelleentulvitusvaiheessa täytyy huomioida sammutusrintaman yläpuolella parantunut lämmönsiirto. Tämä johtuu siitä, että sammutusrintaman edetessä jäädytteestä irtoaa pisaroita ylöspäin, jotka parantavat jäädytystä. Lämmönsiirron lisäys on laitosmallissa mallinnettu empiirisellä korrelaatiolla, joka perustuu ERSEC-koelaitoksella tehtyihin erillisilmiökokeisiin. Lämmönsiirto polttoaineessa on mallinnettu kaksiulotteisesti, jotta voidaan huomioida myös aksiaalisen lämmönjohtumisen vaikutus sammutusrintaman etenemiseen. [39, s. 53]

5 TUTKIMUSMENETELMÄT JA -AINEISTO

Monikanavamallin soveltuvuutta LOCAn mallinnukseen tarkastellaan kolmen eri onnettomuustapauksen avulla. Mallinnettaviksi onnettomuuksiksi on valittu primääripiirin suurimman putken kaksipäinen giljotiinikatko (2A-LOCA, Double Ended Large Break of the Main Coolant Line), paineistimen yhdyslinjan kaksipäinen giljotiinikatko sekä paineistimen varoventtiilin (PSV, Pressurizer Safety Valve) ja sekundääripiirin höyrylinjojen ulospuhallusjärjestelmän (MSRT, Main Steam Relief Train) venttiilien yhtäaikainen avautuminen. Lisäksi paineistimen varoventtiilin avautumista tarkastellaan vertailukohtana PSV:n ja MSRT:n yhtäaikaiselle avautumiselle.

Vertailukohtana valituille tapauksille toimivat sekä laitostoimittajan analyysit että kokeelliset tulokset. Laitostoimittajan analyysit on laskettu käyttämällä systeemikoodia CATHARE V2.5. [6, s. 2][10, s. 6][22, s. 4] CATHARE on ranskalainen systeemikoodi ja siinä kaksifaasivirtauksen mallinnus on toteutettu kuusiyhtälömallilla kuten Apros-mallissa [9, s. 648–649]. Monet laitosmallissa käytettävät luvussa 4.3 esitetyt korrelaatiot ovat myös sellaisenaan CATHAREssa, mutta koodien välillä on eroavaisuuksiakin [5]. Vertailudata on suurelta osin kerätty analyysiraporteista, mutta joitakin tulosten vertailun kannalta oleellisia tietoja on vain laitostoimittajan analyysien CATHARE-syötetiedostoissa. Kokeellisia tuloksia on saatu SAFIR-projektissa tehdyistä PWR PACTEL -kokeista [59].

Onnettomuustapauksilla tarkastellaan monikanavamallin soveltuvuutta LOCAn mallinnukseen eri tavoilla. 2A-LOCAn avulla tarkastellaan monikanavamallin termohydrauliikkakanavien virtauksien vaihtelua. Kyseessä on alkutilan suureiden pienestä vaihtelusta aiheutuva ilmiö, jonka vaikutukset näkyvät parhaiten tässä onnettomuustapauksessa äärimmäisten ilmiöiden vuoksi. Paineistimen yhdyslinjan katko toistetaan mahdollisimman tarkasti laitostoimittajan käyttämällä oletuksilla, jotta Apros-mallin ominaispiirteet saadaan esille. PSV:n ja MSRT:n yhtäaikaista avautumista vertaillaan kokonaiskoetuloksiin.

Taulukkoon 5.1 on koottu kaikki laskentatapaukset, joilla mallin soveltuvuutta tarkastellaan. Taulukkoon on koottu mitä tuloksia tarkastellaan ja mihin niitä verrataan. Toisen laskentatapauksen eri vika- ja ennakkohuoltoyhdistelmät on erotettu toisistaan a-, b- tai c-kirjaimella. Mallin soveltuvuuteen vaikuttaa se, kuinka hyvin tulokset vastaavat vertailutapauksia ja onko eroja mahdollista selittää esimerkiksi laskentateknisillä syillä.

Taulukko 5.1. Laskentatapaukset, vertailukohteet ja tarkasteltavat tulokset.

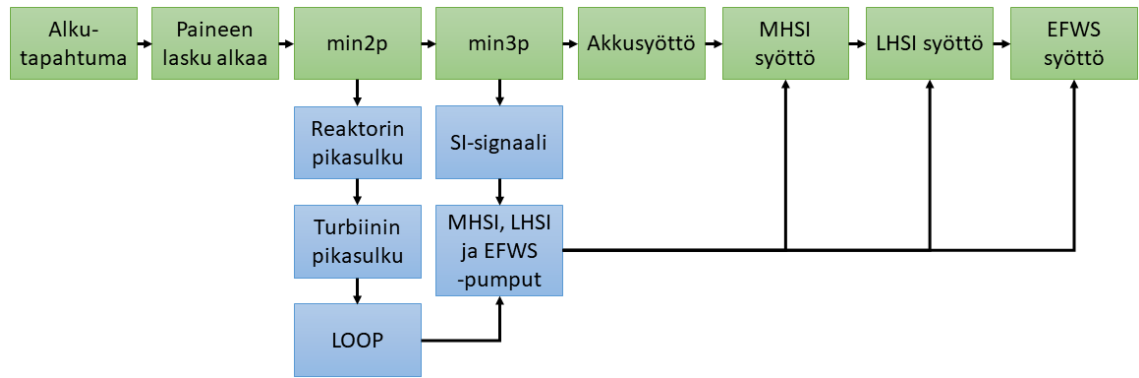
Tapaukset	Mitä tarkastellaan
Tapaus 1, vertailu toistettujen laskentojen välillä	Tarkastellaan massavirtauksien suuntaa ja suuruutta ajan suhteen sydämen ylätukilevyssä ja tämän vaikutusta suojakuoren maksimilämpötilaan.
Tapaus 2a, vertailu laitostoi- mittajan analyysiin	Vertaillaan suojakuoren maksimilämpötilaa, primääri- ja sekundääripainetta ja hätäjähdytysvirtausta. Tar- kastellaan, kuinka hyvin vastaavat toisiaan.
Tapaus 2a, 2b ja 2c, eri vikakonfiguraatioiden vertailu keskenään ja laitostoi- mittajan analyysiin	Vertaillaan suojakuoren maksimilämpötilaa ja tarkas- tellaan, saadaanko korkein lämpötila laitostoi- mittajan analyysin mukaisesta konfiguraatiosta.
Tapaus 3, vertailu laitostoi- mittajan analyysiin, kokeelli- siin tuloksiin ja tapausten vä- lillä	Vertaillaan suojakuoren maksimilämpötilaa, primääri- ja sekundääripainetta ja hätäjähdytysvirtausta. Tar- kastellaan, millainen ero tapausten välillä on ja käyt- täytykö paine samalla tavalla kuin kokeellisissa tu- loksissa.

5.1 Valitut laskentatapaukset

Ensimmäiseksi mallinnettavaksi onnettomuudeksi on valittu 2A-LOCA, jossa putkikatko sijaitsee kylmässä haarassa. Kaksipäinen giljotiinikatko viittaa siihen, että putki katkeaa täysin kahtia ja siten, että vuodon poikkipinta-ala on kaksi kertaa putken poikkipinta-alan suuruinen. 2A-LOCA on suurin mahdollinen vuototilanne. [6, s. 1]

Kuvassa 5.1 on esitelty tapahtumasarja ensimmäiselle laskentatapaukselle. Tässä tapahtumasarja alkaa nopealla paineenlaskulla primääripiirissä ja paineistimessa. Paineistimen alhainen paine eli raja min2p aiheuttaa reaktorin pikasulun, joka taas aiheuttaa turbiinin pikasulun. Turbiinin pikasulun yhteydessä oletetaan ulkoisen sähköverkon menetys (LOOP, Loss Of Offsite Power), mikä merkitsee analyysin kannalta sitä, että pääkiertopumput (RCP, Reactor Coolant Pump) ja syöttövesipumput pysähtyvät pahentaen onnettomuutta entisestään. Hätäjähdytysignaali (SI, Safety Injection) käynnistyy, kun paineistimen paine laskee entisestään alle rajan min3p. Tämä käynnistää hätäjähdytyspumput varavoimadieselgeneraattoreiden käynnistys- ja kuormitussekvenssin mukaisilla viiveillä. [6, s. 4–5, 93]

Koska hätäjähdytyspumppujen käynnistymisessä on viive, alkavat paineakut syöttämään vettä ensimmäisenä primääripiiriin. Paineen lasku on niin nopeaa, että keskipaineinen (MH-SI, Medium Head Safety Injection) ja matalapaineinen hätäjähdytysjärjestelmä (LH-SI, Low Head Safety Injection) alkavat syöttämään vettä primääripiiriin heti pumppujen käynnistyttyä. Hätäsyöttövesijärjestelmä (EFWS, Emergency Feedwater System) käynnistyy ja alkaa pumppaamaan vettä höyrystimiin automaattisesti, kun ulkoinen sähköverk-

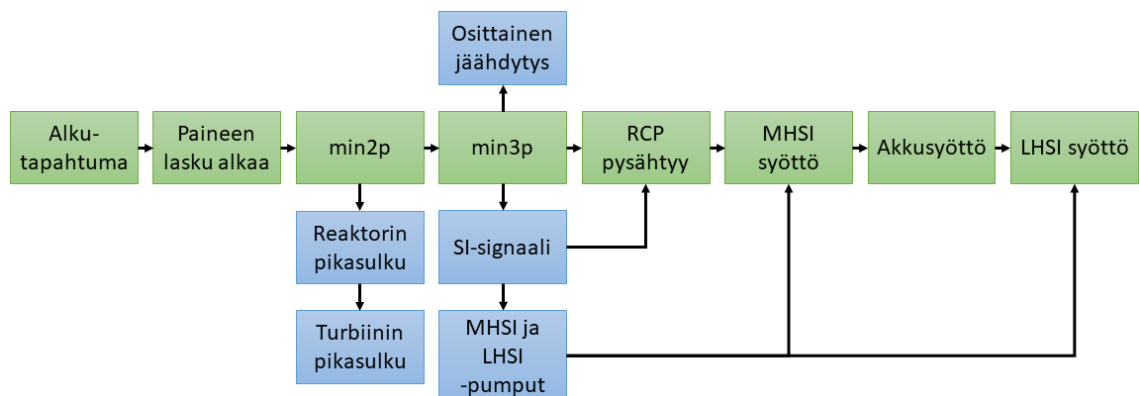


Kuva 5.1. Tapahtumasarja 2A-LOCAssa (tapaus 1) [6, s. 4–5, 93].

ko on menetetty ja SI-signaali on voimassa. Osittainen jäähdytys käynnistyy 2A-LOCAn tapauksessa, mutta paineen nopean laskun takia se ei käytännössä vaikuta lopputulokseen, minkä takia voidaan onnettomuutta pahentavana tekijänä olettaa kyseisen toiminnon vikaantuminen. [6, s. 5, 93]

Toiseksi mallinnettavaksi onnettomuudeksi on valittu paineistimen yhdyslinjan kaksipäinen giljotiinikatko. Paineistimen yhdyslinja liittyy pääkiertopiiriin 3 kuumaan haaraan ja se on pääkiertopiireihin liittyvistä putkiyhteistä suurin. Paineistimen yhdyslinjan giljotiinikatko määritellään suureksi LOCAksi. [10, s. 1]

Tapahtumasarja tässä on hyvin samantapainen kuin 2A-LOCAssa turbiinin pikasulkuun asti. Kuvassa 5.2 on esitelty tapahtumasarja toiselle laskentatapaukselle. Paineistimen paineraja min3p käynnistää tässä tapauksessa myös osittaisen jäähdytyksen, joka laskee sekundääripiiriin höyryn painetta ulospuhallusventtiileillä. Kun paine-ero kolmen pääkiertopumpun yli on liian pieni, hätäjäähdytyssignaalin ollessa voimassa kaikki pääkiertopumput pysähtyvät suojaussignaalista. Jos onnettomuustilanteessa oletetaan ulkoisen verkon menetys, pääkiertopumput pysähtyvät sähkönmenetykseen. [10, s. 1–2]



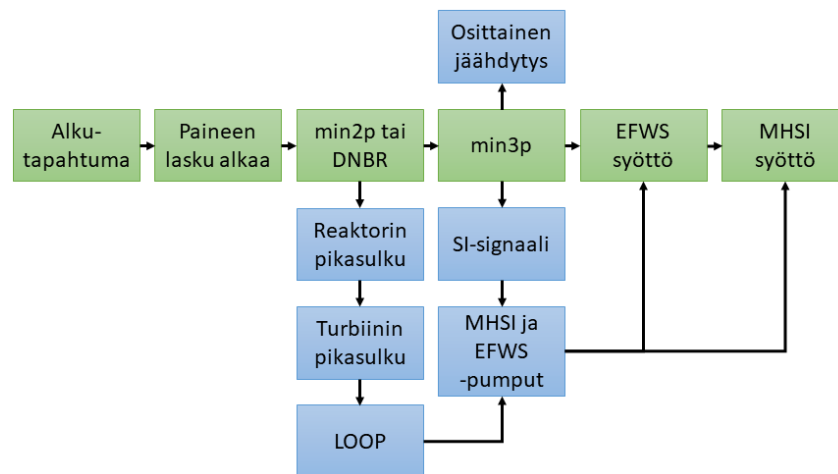
Kuva 5.2. Tapahtumasarja paineistimen yhdyslinjan katkossa (tapaus 2) [10, s. 1–3, 44].

Paineistimen yhdyslinjan katkossa primääripaine laskee hitaasti, jolloin se saavuttaa ensimmäiseksi keskipaineisen hätäjäähdytyksen tason, ja MHSI lähtee syöttämään vettä

piiriin ensimmäisenä. Tämä ei kuitenkaan kompensoi vuotavan jäähdytteen määrää, joten paine jatkaa laskemista. Paine laskee ensin paineakkujen paineen tasolle, ja lopulta LHSI:n tasolle, jolloin vuoto saadaan kompensoitua hätäjähdytysjärjestelmällä. [10, s. 2–3, 44]

Kolmanneksi onnettomuustilanteeksi on valittu paineistimen varoventtiilin ja neljän sekundaaripiirin höyrylinjan ulospuhallusventtiilin yhtäaikainen avautuminen. Onnettomuus saa alkunsa harvinaisesta automaation yhteisviasta, jonka takia kyseiset venttiilit avautuvat virheellisesti. [59] Koska onnettomuustilannetta ei ole analysoitu osana laitoksen lopullista turvallisuusselostetta eikä sille siten löydy tarkkaa vertailukohtaa, tarkastellaan työssä myös pelkkää paineistimen varoventtiilin avautumista, joka on hyvin samankaltainen tapahtuma.

Kuvassa 5.3 on esitelty tapahtumasarja paineistimen varoventtiilin avautumiselle. Tässäkin tapahtumasarja alkaa primääripiirin ja paineistimen nopealla paineen laskulla. Paineistimen varoventtiilien kautta tapahtuvassa vuodossa kaksifaasipinta nousee vuotovirtauksen ja jäähdytteen höyrystymisen vuoksi. Reaktorin pikasulku saadaan joko paineistimen alhaisen paineen tai matalan DNBR:n suojaustoiminnosta. Tämän jälkeen tapahtumasarja on toimintojen käynnistymisen kannalta samanlainen kuin muissa laskentata-pauksissa. [22, s. 1–2]



Kuva 5.3. Tapahtumasarja paineistimen varoventtiilin avautumisessa (tapaus 3) [22, s. 1–2].

Paineistimen varoventtiilin kautta vuotavan jäähdytteen määrä on niin pieni, että MHSI pystyy kompensoimaan vuodon, jolloin muita hätäjähdytysjärjestelmiä ei tarvita. Paineen lasku on tällöin niin hidasta, että osittaisella jäähdytyksellä on tärkeä rooli primääripiirin paineen laskemisessa riittävän alhaiseksi hätäjähdytysyötölle. [22, s. 1–2] PSV:n ja MSRT:n yhtäaikaisessa avautumisessa tapahtumasarja on muuten samanlainen, mutta osittainen jäähdytys ei toimi suunnitellulla tavalla, sillä MSRT:n säätöventtiilit eivät reagoi paineensäätäjän käskyihin. MSRT:n eristysventtiilien avautuminen laskee höyryn pai-

netta nopeammin kuin osittainen jäähdytys, mikä aiheuttaa primääripaineen nopeampaa laskua onnettomuuden alussa ja siten enemmän jäähdytteen höyrystymistä. [59]

5.2 Alkuoletukset

Laitostoimittajan analyysissä ja kokeellisessa tutkimuksessa on tehty oletuksia laitoksen alkutilan, toimintojen käynnistymisen, käytössä olevien järjestelmien ja vikaoletuksien suhteen. Näistä oletuksista esitellään ne, jotka on ollut mahdollista huomioida tässä työssä. Näin laskentatulokset ovat vertailukelpoisia laitostoimittajan analyysien tai kokeellisten tuloksien kanssa.

5.2.1 Laitosmallin alkutila

Ensimmäisessä laskentatapauksessa huomioidaan laitostoimittajan analyysin alkuarvot ja oletukset. Primääripiirin paine ja lämpötila ovat nimellisarvoissa, mutta reaktorin tehossa on huomioitu epävarmuus ylöspäin eli alkuteho ja siten polttoaineeseen varastoitunut energia on maksimoitu. LHSI-järjestelmän lämpötila on asetettu maksimiarvoon. MHSI-järjestelmän syöttämä vesi on asetettu kymmenen astetta maksimiarvoa lämpimämmäksi, sillä MHSI-virtausta ei jäähdytetä laitoksella, jolloin hätäjäähdytysaltaan lämpeneminen tulee huomioida analyysissä. [6, s. 24, 89–90] Uraanioksidin ja kaasuraon lämmönjohtavuudelle käytetään Aproksen 2A-LOCAn validointiraportin arvoja sekä tässä että muissakin laskentatapauksissa [36, s. 5–11]. Kaasuraon lämmönjohtavuus on minimoitu, mikä kasvattaa entisestään polttoaineeseen varastoitunutta energiaa [60, s. 6].

Polttoaine-elementtien aksiaalitehojakauman suurimmat arvot on painotettu elementtien yläosaan, sillä reaktorin yläosan ollessa kauemmin ilman vettä, saadaan suojakuoren maksimilämpötilaksi korkeampi arvo. Suhteellinen teho kuumalle sauvalle ja kuumalle elementille on esitetty taulukossa 5.2. [6, s. 7, 92–95] Suhteellinen teho kuvaa kyseisen elementin tai sauvan tehoa suhteessa keskiarvotehoon ja aksiaalitehojakauma kuvaa tehon jakautumista elementissä tai sauvassa pituussuunnassa. Aprokseen aksiaalitehojakaumat annetaan normalisoidussa muodossa eli tehokertoimet on suhteutettu kertoimien keskiarvoon. [36, s. 8–10] Tapauksessa 1 käytettävät aksiaalitehojakaumat on esitetty kuvassa A.1 sekä taulukoissa A.1, A.2 ja A.3.

Toisessa laskentatapauksessa myös primääripiirin paineessa ja lämpötilassa on huomioitu epävarmuus ylöspäin. Lisäksi MHSI- ja LHSI-järjestelmien lämpötilat on asetettu 20 astetta maksimilämpötilaa korkeammaksi tarkoituksena huomioida vuotovirtauksen aiheuttama hätäjäähdytysvesialtaan lämpeneminen. [10, s. 8, 30] Suhteellinen teho kuumalle sauvalle on sama kuin ensimmäisessä tapauksessa, mutta kuuman elementin teho on suurempi. Suhteutetut aksiaalitehojakaumat kuumalla sauvalla ja kuumalla elementillä ovat samat, sillä kuuman elementin teho on ilmoitettu kuuman sauvan arvojen avulla suh-

deluvulla 1,04. [10, s. 8, 47] Aksiaalitehojakaumat tähän laskentatapaukseen on esitetty kuvassa A.2 sekä taulukoissa A.4 ja A.5.

Paineistimen varoventtiilin avautuminen on laitostoimittajan analyysissä laskettu konservatiivisesti valituilla lähtötilan prosessiparametreilla [22, s. 5, 13]. Tässä työssä näin ei kuitenkaan tehdä, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia PSV:n ja MSRT:n yhtäaikaisen avautumisen sekä kokeellisten tulosten kanssa. [59] Poikkeuksena laitostoimittajan analyysiin kanavien ja kuumen sauvan suhteelliset tehot ja aksiaalitehojakaumat ovat nyt samat kuin toisessa laskentatapauksessa. Tämä on valittu siksi, koska laitostoimittajan vertailtavassa analyysissä laskenta on suoritettu vain elementtien keskiarvoteholla. Analyysissä polttoainesauvojen lämmönsiirtokriisin marginaali on laskettu eri koodilla, jonka perusteella kuumen sauvan tarkastelu on voitu jättää pois CATHAREN laskennasta. [22, s. 3–6] Kaikkien alkutilojen oletukset on koottu taulukkoon 5.2.

Taulukko 5.2. Laskennassa käytettäviä alkutilan oletuksia. [6, s. 89–90][10, s. 30][36, s. 5][59]

Suure	Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3
Reaktorin teho	102 %	102 %	100 %
Primääripaine	155 bar	157,5 bar	155 bar
Primäärilämpötila	313,6 °C	316,1 °C	313,6 °C
Paineakku lämpötila	50 °C	50 °C	-
MHSI lämpötila	52 °C	62 °C	20 °C
LHSI lämpötila	42 °C	62 °C	-
Kuumen sauvan suhteellinen teho	1,93	1,93	1,93
Kuumen elementin suhteellinen teho	1,74	1,8558	1,8558

Kanavien 2-9 suhteelliset tehot on määritetty kanaviin jaettujen polttoaine-elementtien suhteellisten tehojen keskiarvona. Monikanavamalliin on valittu turvallisuusanalyysijä varten suunniteltu 12 kuukauden tasapainolatauksen käyttöjakson alkupiste, jossa elementtien suhteelliset tehot ovat suurimpia [57, s. 81]. Tehot on järjestetty suuruusjärjestykseen ja jaettu kanaviin 1-9 siten, että kanavien 7 ja 9 suhteelliseksi tehoksi tulee sama arvo ja kanavaan 8 on asetettu pienimmän tehon elementit [36, s. 3–5]. Keskimmäisen kanavan teho määräytyy laitostoimittajan LOCA-analyysissä käytetyn arvon mukaan ja tehosta on vähennetty erikseen mallinnetun kuumen sauvan teho. Tästä syystä kanavan 6, jonka elementtien tehot ovat lähimpänä keskiarvoa, tehoa on laskettu, jotta reaktorin kokonais-teho pysyy oikean suuruisena. Kaikkien laskentatapausten kanavatehot on koottu taulukkoon 5.3. Nämä on laskettu kanavan suhteellisen tehon, kanavan elementtilukumäärän ja yhden elementin keskiarvotehon tulona.

Taulukko 5.3. Laskennassa käytettävien kanavien ja kuuman sauvan lämpötehot (MW) sadan prosentin teholla.

Kanava	Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3
1	279,2808	297,8712	297,8712
2	407,5187	407,5187	407,5187
3	588,2614	588,2614	588,2614
4	722,6141	722,6141	722,6141
5	854,6473	854,6473	854,6473
6	836,6266	818,0362	818,0362
7	289,7593	289,7593	289,7593
8	114,1909	114,1909	114,1909
9	206,9710	206,9710	206,9710
Kuuma sauva	0,1299	0,1299	0,1299

5.2.2 Toimintojen käynnistyminen ja käytössä olevat järjestelmät

Toimintojen käynnistymiseen liittyvät viiveet ja epävarmuudet huomioidaan siten, että ne olisivat mahdollisimman epäedulliset onnettomuuden kannalta. Taulukkoon 5.4 on koottu painerajoja liittyen eri toimintojen käynnistymiseen. Erilaiset viiveet ja epävarmuudet rajoissa johtuvat mittausten epävarmuuksista sekä automaation vasteajoista [61, s. 33–35].

Taulukko 5.4. Laskennassa käytettäviä toimintojen käynnistymisten oletuksia. [6, s. 4–5, 93] [10, s. 9–11] [59][60, s. 9]

Toiminto	Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3
Reaktorin pikasulku (paineistimen paineraja min2p)	130 bar	130 bar	135 bar
Hätäjäähdytysignaali (paineistimen paineraja min3p)	110 bar	110 bar	115 bar
Osittainen jäähdytys asetusarvo (sekundääripaine)	-	97 bar	95,5 bar tai -
Pääkiertopumppujen pysäytys	LOOP	Pumppujen matalasta paine-erosta tai LOOP	LOOP

Reaktorin pikasulku käynnistyy ensimmäisessä tapauksessa alhaisesta paineistimen paineesta. Painerajassa on huomioitu 5 baarin epävarmuus siten, että raja on alhaisempi. Pikasulkusignaalin käynnistymisessä on 0,9 sekunnin viive. Säättösauvojen lasku alkaa 0,4 sekunnin viiveellä. Reaktorin pikasulkusignaali aiheuttaa turbiinin pikasulun 2,4 sekunnin viiveellä. Turbiinin pikasulun yhteydessä oletetaan ulkoisen sähköverkon mene-

tys, jolloin pääkiertopumput ja syöttövesipumput pysähtyvät. Häätäjäähdytysignaali käynnistyy paineistimen matalasta paineesta 0,9 sekunnin viiveellä. Tässäkin on huomioitu 5 baarin epävarmuus rajaa alentavasti. Koska ulkoinen sähköverkko on menetetty, häätäjäähdytyspumppujen käynnistymisessä on 30 sekunnin lisäviive. MHSI-pumput käynnistyvät 6 sekuntia ennen LHSI-pumppuja. Myös EFWS-pumppujen käynnistymisessä on ylimääräinen 41 sekunnin viive 15 sekunnin käynnistymisviiveen lisäksi, joka johtuu varavoimadieselgeneraattoreiden käynnistys- ja kuormitussekvensseistä. [6, s. 4–5, 93]

Toisessa laskentatapauksessa toimintojen käynnistymiseen liittyvät viiveet ovat samat kuin ensimmäisessä tapauksessa. Tapauksessa 2a ulkoisen sähköverkon menetystä ei oleteta, mutta laitostoimittajan analyysissä on huomioitu tästä aiheutuva ylimääräinen viive pumppujen käynnistymiselle. Tapauksissa 2b ja 2c on oletus ulkoisen verkon menetyksestä, joten tähän liittyvät oletukset huomioidaan näissä kuten ensimmäisessä laskentatapauksessa. Häätäjäähdytysignaalin yhteydessä käynnistyy myös osittainen jäähdytys, joka säätää sekundääripiirin höyryn ulospuhallusventtiilien virtausta siten, että lämpötila höyrystimissä laskee 250 °C tunnissa [61, s. 50]. Ulospuhallusventtiilit avautuvat 1,8 sekunnin viiveellä siten, että 1,5 sekuntia on viivettä ja 0,3 sekuntia on venttiilin avautumisaikaa. Lisäksi ulospuhallusventtiilien avautumisen asetusarvossa on huomioitu 1,5 baarin epävarmuus höyrystimien paineessa ylöspäin. Ulospuhallusventtiilien virtauskapasiteetti on minimoitu onnettomuutta pahentavana tekijänä. EFWS-pumput käynnistyvät häätäjäähdytysignaalista, mutta EFWS-säätöventtiilit aukeavat ja hätäsyöttöveden pumpaus höyrystimeen käynnistyy vasta höyrystimien matalasta pinnankorkeudesta silloin, kun ulkoisen verkon menetystä ei oleteta. [10, s. 9–11]

Kolmannessa tapauksessa reaktorin pikasulku käynnistyy joko paineistimen alhaisesta paineesta tai alhaisesta DNBR:stä. Laitostoimittajan analyysissä toimintojen käynnistymisessä on tehty muuten samat oletukset kuin toisessa laskentatapauksessa. [22, s. 6–8] Kaikkia konservatiivisia oletuksia ei laskennassa huomioida, sillä tässä tapauksessa pyritään toistamaan koejärjestely mahdollisimman hyvin. Toimintojen käynnistymiseen liittyvät viiveet on huomioitu samalla tavalla kuin muissakin laskentatapauksissa, mutta toimintoihin liittyvät painerajat ovat nimellisarvoissaan. Kokeellisissa tuloksissa verkon menetys oletetaan silloin, kun primääripiirin paine alittaa 122 baarin rajan. Lisäksi koelaitteiston paineistimen lämmittimet on sammutettu, kun pinnankorkeus saavuttaa 7,5 metrin korkeuden. [59] Nämä oletukset tehdään myös Apros-laskennassa.

5.2.3 Vikaoletukset

Onnettomuustilanteiden analyyseissä huomioidaan mahdolliset vikatilanteet ja ennakoivuudet turvallisuusjärjestelmissä. Oletukset tehdään YVL-ohjeiden vaatimusten mukaisesti ja siten, että ne ovat onnettomuuden kannalta mahdollisimman rajoittavat [75, s. 9–11]. Taulukkoon 5.5 on koottu laskentatapauksissa käytössä olevien turvallisuusjärjestel-

mien määrät sen jälkeen, kun huomioidaan viat ja ennakkohuollot. Taulukkoon on myös merkitty, mikäli kyseissä laskentatapauksessa oletetaan ulkoisen sähköverkon menetys.

Taulukko 5.5. Käytettävissä olevien turvallisuusjärjestelmien määrä ja oletus ulkoisen sähköverkon menetyksestä. [6, s. 3, 56] [10, s. 7, 33] [59][60, s. 4–5]

Oletus tai järjestelmien määrä	Tapaus 1	Tapaus 2a	Tapaus 2b	Tapaus 2c	Tapaus 3
LOOP oletus	kyllä	ei	kyllä	kyllä	kyllä
Paineakut	3	3	4	3	4 (ei tarvita)
MHSI-pumput	1	2	2	2	2
LHSI-pumput	1	3	2	2	2 (ei tarvita)
EFWS-pumput	2	4	2	3	2

Ensimmäisessä tapauksessa oletetaan ulkoisen sähköverkon menetyksen lisäksi yhden varavoimadieselgeneraattorin vikaantuminen, jolloin menetetään yhdet MHSI-, LHSI- ja EFWS-pumput. Järjestelmän toiminnan estävä huolto oletetaan toiseen varavoimadieselgeneraattoriin, jolloin toisetkin MHSI-, LHSI- ja EFWS-pumput poistuvat toiminnasta. Koska oletetaan, että vuotavaan haaraan syötettävä hätäjähdytysvesi poistuu suoraan vuotokohdasta, käytössä on käytännössä kolme paineakua sekä yksi MHSI- ja LHSI-pumppu. Vuodon oletetaan olevan pääkiertopiirissä 1, joten ainoa toimiva hätäjähdytysyöttö tapahtuu pääkiertopiiriin 4. Näin hätäjähdytysyöttö tapahtuu mahdollisimman lähellä vuotokohtaa, jolloin osa hätäjähdytysvedestä ei päädy sydämeen asti, vaan kulkeutuu vuotavasta kylmästä haarasta suojarakennukseen. [6, s. 3, 56]

Paineistimen yhdyslinjan katkon pahin vika- ja ennakkohuoltoyhdistelmä on laitostoimittajan analyysin mukaan vika pääkiertopiiriin 2 hätäjähdytysjärjestelmän takaiskuventtiilissä ja ennakkohuolto pääkiertopiiriin 1 MHSI-pumpussa. Onnettomuustapaus on laskettu myös kahdella muulla vika- ja ennakkohuoltoyhdistelmällä, joissa molemmissa oletetaan ulkoisen sähköverkon menetys. Ensimmäisessä tapauksessa vika oletetaan pääkiertopiiriin 2 varavoimadieselgeneraattoriin ja ennakkohuolto pääkiertopiiriin 3 varavoimadieselgeneraattoriin. Toisessa tapauksessa oletetaan pääkiertopiiriin 1 hätäjähdytysjärjestelmän takaiskuventtiiliin vika ja ennakkohuolto samoin kuin edeltävässä tapauksessa. [10, s. 7, 33] Eri konfiguraatioiden oletukset on koottu taulukkoon 5.5 samassa järjestyksessä, kuin ne on tässä esitetty.

PSV:n ja MSRT:n yhtäaikaisessa avautumisessa käytetään samoja vikaoletuksia kuin paineistimen varoventtiilin avautumisessa [59]. Tässä tapauksessa oletetaan ulkoisen sähköverkon menetys. Laitostoimittajan analyysissä on määritetty pahimmaksi vika- ja ennakkohuoltoyhdistelmäksi vika sekä ennakkohuolto varavoimadieselgeneraattoreissa. Tällöin vain kaksi varavoimadieselgeneraattoria on käytössä, jolloin turvallisuusjärjestelmistä ovat toiminnassa kaikki paineakut sekä MHSI-, LHSI- ja EFWS-pumput pääkier-

topiireissä 1 ja 4. Käytännössä paine laskee primääripiirissä niin vähän ja hitaasti, että paineakkuja tai LHSI-pumppuja ei voida käyttää. [22, s. 4–5]

5.3 Onnettomuusluokkien hyväksymiskriteerit laskentatapauksille

Ensimmäinen ja toinen laskentatapaus kuuluvat luokkaan DBC4. Onnettomuuksien kannalta tärkeimmät hyväksymiskriteerit liittyvät vaurioituneiden polttoainesauvojen lukumäärään, suojakuoren maksimilämpötilaan, suojakuoren oksidikerrokseen ja vedyn määrän syntyamiseen. Suurin osa vaatimuksista on esitelty luvussa 2.2 ja taulukossa 2.2. Vedyn syntyminen on rajoitettu siten, että sitä saa syntyä enintään yksi prosentti siitä määrästä, joka syntyisi, mikäli koko suojakuori reagoisi jäähdytteen kanssa vetyä muodostaen. Lisäksi jäähdytteen virtausreitit polttoaine-elementeissä eivät saa tukkeutua vaarantaen jäähdytystä. Analyyseissä tulee osoittaa, että pitkällä aikavälillä laitos saadaan hallitusta tilasta turvalliseen tilaan. [6, s. 1–2][10, s. 5][74, s. 10–11]

Paineistimen varoventtiilin virheellinen avautuminen kuuluu luokkaan DBC3. Hyväksymiskriteerit ovat tiukemmat verrattuna luokkaan DBC4. Suojakuoren maksimilämpötila on rajoitettu kuten taulukossa 2.2. Lämmönsiirtokriisiin joutuvien polttoainesauvojen lukumäärä on rajattu yhteen prosenttiin. Lisäksi mekaanisten vuorovaikutusten aiheuttamien polttoainevaurioiden määrä ei saa ylittää 0,1 prosenttia polttoainesauvojen määrästä. Kuten DBC4:ssä, laitos tulee saada hallitusta tilasta turvalliseen tilaan. [22, s. 3][74, s. 9–10]

PSV:n ja MSRT:n yhtäaikainen avautuminen kuuluu luokkaan DEC-B. Tähän luokkaan kuuluvat onnettomuudet, joiden aiheuttaja on PRA:n perusteella todettu merkittävä viikayhdistelmä [80]. Hyväksymiskriteerit ovat hyvin pitkälti samat kuin luokassa DBC4, mutta DEC-onnettomuuksissa vaurioituneiden polttoainesauvojen määrälle ei ole asetettu ylärajaa. [74, s. 10–11]

5.4 Laskentamenetelmät

Kaikkien onnettomuustapausten mallintamiseen käytetään Aproksen versiota 6.09.33. Monikanavamallin versiota 20201006_OL3_loca2a.aprosz käytetään laskentatapauksille 1 ja 3. Versiota 20201009_OL3_loca2a.aprosz käytetään ensimmäisen ja toisen laskentatapauksen mallintamiseen. Jälkimmäiseen malliversioon on mallinnettu polttoaine-elementtien säätösauvojen ohjausputket. Ohjausputkia on yhdessä elementissä 24 ja yhteen laskentakanavaan kuuluvien polttoaine-elementtien kaikki ohjausputket on niputettu virtauskanavaan, joka on kytketty lämpörakenteilla reaktorin laskentakanavaan. Tässä luvussa esitellään malleihin tehtävät muutokset, alkutilojen simuloinnit sekä itse onnettomuustilanteiden simuloinnit.

5.4.1 Tapaus 1: 2A-LOCA

Monikanavamalliin on valmiiksi rakennettu 2A-LOCAa varten vuotoventtiilit, jotka mallintavat kylmän haaraan katkeamista juuri ennen alasmenotilaa. Mallin perustilassa aksiaalitehojakaumat ovat nimellisarvoissa, mutta laskenta toteutetaan mallin validointiraportin mukaisesta alkutilasta aksiaalitehojakaumien sekä kaasuraon lämmönjohtavuuden suhteen [36]. Kanavien tehot asetetaan taulukon 5.3 mukaisiksi. Jotta MHSI:n lämpötila saadaan taulukon 5.2 mukaiseksi, lisätään pääkiertopiirin 4 hätäjähdytysjärjestelmään toinen simuloinnista poistettu piste, jonka lämpötila asetetaan korkeammaksi. Simuloinnista poistettu piste toimii tällöin reunaehtona laskennalle. Muuten mallin alkutila vastaa taulukkoa 5.2.

Monikanavamallissa kemikaalien- ja tilavuudensäätöjärjestelmä on poistettu simuloinnista. Koska paineistimen pinta on alkutilassa liian matala, järjestelmä täytyy ottaa käyttöön tasapainosimuloinnin ajaksi. Lisäksi erilaisia rajoitustoimintoja täytyy ottaa pois simuloinnista, jotta paineensäätö ja tämän kautta pinnankorkeuden säätö pysyvät normaalin säädön alueella. Kun tasapaino on saavutettu, kemikaalien- ja tilavuudensäätöjärjestelmän uloimmat sulkuventtiilit suljetaan siten, että niille asetetaan sama ajoaika. Näin järjestelmään ja siitä pois ei virtaa jäähdytettä eri pääkiertopiireistä ja -piireihin. Tämän jälkeen kemikaalien- ja tilavuudensäätöjärjestelmä poistetaan simuloinnista ja rajoitustoiminnot palautetaan. Todellisessa LOCA-tilanteessa järjestelmä eristettäisiin automaattisesti, mutta tässä tapauksessa mallinnusta on yksinkertaistettu.

Toimintojen käynnistyminen huomioidaan sekä alkutilaan tehtävin muutoksin, joista osa on esitetty liitteessä B, että laskennan aikana tehtävillä toimenpiteillä, jotka on esitetty liitteessä C. Jotta reaktorin pikasulku tulisi samasta signaalista, kuin validointiraportissa ja laitostoimittajan analyysissä, pikasulkusignaalit kuuman haaran paineesta ja matalasta pääkiertopiirien virtauksesta on poistettu simuloinnista. Reaktorin pikasulkudiagrammia on muokattu siten, että viive säätösauvojen laskemisen alkamiseen on huomioitu vain reaktorin tehoa säätävillä diagrammeilla, jolloin itse pikasulkusignaalissa on 0,9 sekunnin viive. Myös turbiinin pikasulun viive on korjattu. Paineraajat mallissa ovat valmiiksi halutut.

Ulkoisen verkon menetyksen aiheuttamat käynnistymisviiveet on mallinnettu asettamalla pumput aluksi vikatilaan, jolloin laskennan aikana oikealla ajanhetkellä tarvittavat pumput voidaan asettaa takaisin toimintaan. Jotta EFWS-pumput alkavat syöttämään vettä oikeaan aikaan, toimivien järjestelmien säätöventtiilit asetetaan alkutilassa auki, sillä nykyisessä mallissa säätöventtiilit avautuisivat vain höyrystimien matalasta pinnankorkeudesta. Vikaoletukset on huomioitu alkutilassa asetetuilla pumppujen vikatiloilla. Pääkiertopiirin 1 hätäjähdytysjärjestelmä on poistettu kokonaan simuloinnista, sillä se syöttää kaiken veden suoraan vuotokohtaan. Laitosmalli simuloidaan tasapainotilaan näillä muutoksilla. Hätäjähdytysjärjestelmän lämpötilat on asetettu suoraan halutun suuruisiksi.

Mallissa tehon ja suojarakennuksen paineen käyttäytyminen on toteutettu validointiraportin mukaisesti niin, että onnettomuus alkaa 30 sekuntia simuloinnin aloituksesta [36, s. 11]. Simulointitiedosto on esitetty liitteessä C. Aika-askel muutetaan pienemmäksi 0,1 sekuntia ennen vuodon alkamista. Vuodon alkaessa vuotoventtiilit avataan ja näiden väliin putkilinjaan asetetaan erittäin suuri painehäviö. Tällöin kaikki vuotava jäähdyte pääsee purkautumaan vain vuotoventtiilien kautta suojarakennuksen vastapainetta kuvaavaan simuloinnista poistettuun pisteeseen, jonka painetta muutetaan ajan suhteen validointiraportissa olevan taulukon mukaan [36, s. 7].

Onnettomuuden alkua mallintamalla on selvitetty turbiinin pikasulkuhetki, jonka perusteella ulkoisen verkon menetykset on mallinnettu varsinaisessa simuloinnissa. Tämän jälkeen huomioidaan ulkoisen verkon menetyksestä aiheutuvat viiveet MHSI- ja LHSI-pumppujen käynnistymiselle. Seuraava vaihe onnettomuuden mallinnuksessa on akkusyötön loppuminen. Tällöin hätäjähdytysvettä syötetään vain pääkiertopiiristä 4, joten CCFL-korrelaation yhtälössä 4.9 määritelty etäisyys on korjattava alasmenotilaan. Lopuksi käynnistetään vielä sähköä saavat EFWS-pumput, kun ulkoisen verkon menetyksen alkamisesta on kulunut sen aiheuttama viive.

Aproksessa laskennan alustuksessa eri prosessisuureet laskentanoodeissa ja -haaroissa saattavat hiukan muuttua. Aproksessa on toiminto, jonka pitäisi estää tämä alustuksen aikana, mutta se ei toimi täysin oikein tässä työssä käytettävässä Apro-versiossa. [4] Tässä siis tarkastellaan laskentatapausta ilman mainitun toiminnon käyttämistä, jolloin saadaan näkyviin tapauksen herkkyyden alkutilan pienille eroille. Laskenta toistetaan samasta alkutilasta samalla tavalla kolme kertaa, jolloin eron aiheuttaja on alustuksesta johtuva pieni prosessisuureiden vaihtelu. Laskennasta kerätään massavirrat sydämen ylätukilevyssä, eli heti kanavien yläpuolelta, sekä suojakuoren maksimilämpötila, jotta voidaan tarkastella eroavaisuuksia massavirtojen käyttäytymisessä ja niiden mahdollista vaikutusta suojakuoren maksimilämpötilaan. Tapausta tarkastellaan myös malliversiolla, johon on mallinnettu ohjausputket. Tällä mallilla laskenta toistetaan samasta alkutilasta samalla tavalla kaksi kertaa ja laskennasta kerätään samat suureet kuin edellä on mainittu.

5.4.2 Tapaus 2: Paineistimen yhdyslinjan katko

Paineistimen yhdyslinjan katkoa varten monikanavamalli on simuloitava eri alkutilaan primääripiirin paineen ja lämpötilan suhteen. Tämä toteutetaan siten, että paine- ja lämpötilamittauksiin asetetaan korjaustermi, jolloin mittaukset näyttävät automaatiolle todellisia prosessiarvoja pienempiä lukemia. Korjaustermi molemmille suureille on -2,5. Aksiaali-tehojakaumat ja kanavien tehot muutetaan taulukoiden A.4, A.5 ja 5.3 mukaisiksi. Kaasuraon lämmönjohtavuus pidetään vakiona, kuten 2A-LOCAssa. Hätäjähdytysjärjestelmien lämpötiloina käytetään taulukon 5.2 arvoja.

Paineen sekä paineistimen pinnankorkeuden nostamisen vuoksi kemikaalien- ja tilavuu-

densäätöjärjestelmä täytyy ottaa käyttöön alkutilan simuloinnin ajaksi kuten ensimmäisessä tapauksessa. Lämpötilan kasvattamiseksi höyrystimien lämmönsiirtoa on heikennetty muuttamalla laskentatason noodeihin höyrystimien tuubien lämmönsiirron hyötysuhteeksi 0,75. Arvo ei ole sama kuin laitostoimittajan analyysissä, jossa prosessin tilassa on huomioitu höyrystimien likaantuminen ja tulppaaminen, mutta aikaisemmillä mallin virityksillä on todettu, että kyseisellä arvolla päästään vastaavaan prosessitilaan. [10, s. 30]. Näiden lisäksi turbiinin tehonsäätöä on viritetty manuaalisesti, jolloin sekundääripiirissä paine kasvaa ja lämmönsiirto höyrystimiltä heikentyy entisestään. Muutokset on esitetty liitteessä B ja niiden mukaisilla muutoksilla malli on simuloitu tasapainotilaan.

Toimintojen käynnistymisviiveet on toteutettu samalla tavalla kuin ensimmäisessä laskentatapauksessa. Liitteessä B on esitetty malliin muutetut viiveet ja painerajat. Tässä tapauksessa osittainen jäähdytys huomioidaan ja paineistimen lämmittimet pidetään automaattisäädöllä. Osittaisen jäähdytyksen asetusarvot on korjattu ja eristysventtiilien avautumiseen liittyvät viiveet on korjattu siten, että avautumissignaaleihin on lisätty viivemuodulit ja venttiilin avautumisaika on korjattu oikeaksi. Virtaus on säädetty venttiileissä minimiin purkauskertoimen avulla. Kerroin on määritetty referenssipaineessa ja arvoksi on saatu 0,41963 [60, s. 37].

Monikanavamallista on poistettu simuloinnista diagrammi, jolta reaktorin terminen teho haaroitetaan osittaisen jäähdytyksen säätäjälle. Diagrammi on palautettu tähän, jotta automaatio säätäisi venttiileiden asentoa jo ennen eristysventtiilien aukeamista tehon perusteella. Reaktorin tehoa laskevaa automaatiodiagrammia on muokattu siten, että vain MSRT:n säätöventtiilien automaatiolle menee laskettu reaktorin teho. Muille diagrammeille menee vakioarvona sadan prosentin teho, sillä näillä ei ole vaikutusta monikanavamallissa tai tässä laskentatapauksessa.

Paineistimen yhdyslinja on mallinnettu kolmella putkimoduulilla, joten putkikatkon simuloimiseksi keskimäinen moduuli jaetaan kahteen osaan, joista lähempänä paineistinta olevan pituudeksi asetetaan 12,26 metriä ja toiselle 12,25 metriä. Näiden välille asetetaan kaksi pistettä, joiden korkeusasema on puolessa välissä alkuperäistä putkimoduulia korkeudella 9,07 metriä. Näiden pisteiden väliin on asetettu 0,5 metrin mittainen putkimoduuli. Putkimoduulin ominaisuudet on kopioitu ensimmäisestä laskentatapauksesta putkihalkaisijaa lukuun ottamatta, joka määräytyy yhdyslinjan halkaisijan mukaan. Samalla korkeusasemalla olevat pisteet yhdistetään vuotoventtiileihin, jotka on myös kopioitu ensimmäisestä tapauksesta halkaisijaa lukuun ottamatta. Vuotoventtiilien kautta virtaus kulkee simuloinnista poistettuun pisteeseen, jossa paine on asetettu vakioarvoon 1 baari. Näin pystytään yhdyslinjan giljotiinikatko toteuttamaan samalla tavalla kuin 2A-LOCAn tapauksessa.

Tehon käyttäytyminen mallinnetaan samalla tavalla kuin 2A-LOCAssa, mutta ajan suhteen arvot on muokattu laitostoimittajan analyysin mukaisiksi. Analyysissä oletetaan, että

teho alkaa laskea vasta kun reaktorin pikasulku alkaa, vaikka todellisuudessa teho laskisi luontaisten reaktiivisuustakaisinkytkentöjen vuoksi heti vuodon alusta lähtien. Simulointi toteutetaan liitteen C mukaisella simulointitiedostolla. Alkutapahtuman simulointi on samanlainen kuin 2A-LOCAn tapauksessa. Tämän jälkeen huomioidaan ulkoisen verkon menetyksestä aiheutuvat viiveet pumppujen käynnistymisessä alkaen turbiinin pikasulusta.

Yllä olevaa tapausta vertaillaan laitostoimittajan analyysituloksiin. Tämän lisäksi paineistimen yhdyslinjan katko lasketaan kahdella muulla vika- ja ennakkohuoltoyhdistelmällä. Näiden tapausten muutokset alkutiloihin ja simulointitiedostot on myös esitetty liitteissä B ja C. Ainoat muutokset liittyvät ulkoisen verkon menetykseen ja vikaoletuksien muokkamiseen. Verkon menetykseen liittyvät muutokset on toteutettu samalla tavalla kuin 2A-LOCAssa lukuun ottamatta paineistimen lämmittimiä. Lämmittimet pidetään toiminnassa niiden onnettomuutta pahentavan vaikutuksen vuoksi. Näistä tapauksista on tarpeen vertailla vain suojakuoren maksimilämpötilaa.

Tapaus 2a lasketaan myös malliversiolla, johon ei ole mallinnettu ohjausputkia. Aiemmat malliversioiden tarkastelut viittasivat siihen, että ohjausputkellinen malliversio saattaisi aiheuttaa matalampia suojakuoren lämpötiloja. Eri malliversioita vertaillaan suojakuoren lämpötilatulosten perusteella.

5.4.3 Tapaus 3: PSV:n avautuminen sekä PSV:n ja MSRT:n yhtäaikainen avautuminen

Monikanavamalli on viritetty perustilassa korkeammalle tehotasolle, joten kolmanteen laskentatapaukseen malli on simuloitava 100 prosentin tehotasolle. Lisäksi kanavien tehot, aksiaalitehojakaumat ja kaasuraon lämmönjohtavuus on muutettava samoiksi kuin toisessa laskentatapauksessa. Häätäjähdetyksen veden lämpötila korjataan taulukon 5.2 mukaiseksi. Paineistimen pinnankorkeus on korjattu samalla tavalla kuin ensimmäisessä laskentatapauksessa. Koska vuotovirtaus kulkee paineistimen kautta ja paineistimen laskentanoodien määrä on suhteellisen pieni paineistimen kokoon nähden, vaihdetaan laskentanoodien määräksi 100 yhteen virtauskanavaan. Koska virtauskanavia paineistinmoduulissa on kaksi, tulee laskentanoodien kokonaismääräksi 200.

Toimintojen käynnistyminen huomioidaan sekä alkutilaan tehtävin muutoksin, että laskennan aikana tehtävillä toimenpiteillä. Reaktorin pikasulun viiveet on toteutettu samalla tavalla kuin edellisissä laskentatapauksissa. Näiden lisäksi painerajoja min2p ja min3p on korjattu 5 baaria suuremmiksi taulukon 5.4 mukaisesti. Osittaisen jäähdytyksen käynnistymisen ja toiminnan suhteen on tehty samat toimenpiteet kuin toisessa laskentatapauksessa. Tässä tapauksessa asetusravot ovat valmiiksi halutun alkutilan mukaiset, joten niitä ei tarvitse korjata. Reaktorin tehon lasku on toteutettu samalla tavalla kuin toises-

sa laskentatapauksessa eli reaktorin pikasulun jälkeen, mutta alkaen tämän tapauksen mukaiselta tehotasolta.

Koska koelaitteiston paineistin ei ole yhtä korkea kuin referenssilaitoksen paineistin, lämmittimien sammutuksen pintaraja on skaalattava Aproxseen. Koelaitteiston paineistimen tilavuuden ja poikkipinta-alan avulla on määritetty paineistintilavuuden korkeus, joka on noin 8,7 metriä [37]. Kokonaiskorkeuden ja pintarajan suhdeluku pidetään Aproxsessa samana, jolloin paineistimen kokonaiskorkeuden ollessa 12 metriä saadaan pinnankorkeuden rajaksi 10,33 metriä.

Automaatioon tämä toiminto rakennetaan diagrammille, jossa on paineistimen lämmittimien toimilaite. Tähän hyödynnetään diagrammilla valmiiksi olevaa toimintoa, joka sammuttaa lämmittimet. Paineistimen pinnankorkeus mitataan mittausmoduulin avulla, joka lisätään diagrammille. Tästä pinnankorkeus vietään *Limit value checker* -moduulille, johon on asetettu ylärajaksi 10,33. Tästä moduulista binäärisignaali siirtyy *OR*-moduulille, joka on vaihdettu viiden sisääntulon moduuliksi kolmen sijaan. Toimilaitteen ja *OR*-moduulin välille on lisätty *Flip-flop* -moduuli. Kun signaalin arvoksi vaihtuu tosi, moduuli muistaa tämän, jolloin lämmittimet pysyvät pois päältä.

Ulkoisen sähköverkon menetyksen simulointi toteutetaan samalla tavalla kuin ensimmäisessä laskentatapauksessa. Laitosmallissa on pikasulkusignaali kuumen haaran paineesta, jonka raja normaalisti on 122 baaria, mutta monikanavamalliin raja on muokattu alhaisemmaksi. Raja on korjattu mallin alkutilaan, jolloin sen perusteella on määritetty ulkoisen verkon menetyksen ajankohta.

Kaikki pumput asetetaan alkutilassa vikatilaan ja tarvittavat palautetaan normaalitoimintaan laskennan aikana oikealla ajanhetkellä. Koska paineakkuja ja LHSI-pumppuja ei tässä tapauksessa tarvita, pääkiertopiirien 2 ja 3 hätäjähdytysjärjestelmät on kokonaisuudessaan poistettu simuloinnista. Tämän lisäksi pääkiertopiirien 1 ja 4 paineakkujen takaiskuventtiilit on asetettu vikatilaan, sillä paine laskee hyvin lähelle paineakkujen tasoa. Jotta hätäsyöttövesijärjestelmä käynnistyisi ulkoisen verkon menetyksen yhteydessä, asetetaan pääkiertopiirien 1 ja 4 säätöventtiilit alkutilassa auki kuten ensimmäisessä laskentatapauksessa.

Paineistimen varoventtiilit on tällä hetkellä mallinnettu suoraan kiinni paineistimeen, mutta paineistimen ja venttiilin välissä on todellisuudessa putki. Tämä on korjattu avautuvaan varoventtiilin lisäämällä putki ja piste ennen venttiiliä. Putki on 45 asteen kulmassa ja sen halkaisijaksi on asetettu 132 mm ja pituudeksi 664 mm [11]. Kulman perusteella on putken jälkeisen pisteen korkeusasema asetettu 470 mm korkeammalle kuin paineistimen ylin piste. Näiden lisäksi putkesta on poistettu liikemäärän laskenta, kuten muistakin primääripiirin putkista.

Paineistimen varoventtiilin virtaus on viritetty nimellisarvoon referenssipaineella ja höyry-

virtauksella testaten. Venttiilin purkaukertoimeksi on saatu tällä tavoin 0,8685. [60, s. 40] MSRT:n säätöventtiilien virtaus on viritetty minimin ja maksimin keskiarvoon referenssipaineella samalla tavalla kuin toisessa laskentatapauksessa. Purkaukertoimeksi tässä tapauksessa on saatu 0,46186. [60, s. 37]

Paineistimen varoventtiilin automaatiovika on toteutettu poistamalla laskennan alussa simuloinnista venttiilin toimilaite. Tämän jälkeen laskenta toteutetaan alkutapahtuman suhteen samalla tavalla kuin muissakin laskentatapauksissa. Ulkoisen verkon menetyksen simulointi on toteutettu samalla tavalla kuin tapauksissa 2b ja 2c. Tässä tapauksessa käynnistetään ainoastaan MHSI-pumput, sillä LHSI-pumppuja ei tarvita. Aika-askelta kasvatetaan laskennan edetessä siten, että alun rajuimmat ilmiöt lasketaan pienellä aika-askeleella ja eri ilmiöiden tasaantuessa aika-askelta kasvatetaan. Näin saadaan lyhennettyä laskenta-aikaa ja toisaalta riittävän tarkkoja tuloksia simuloinnista.

PSV:n ja MSRT:n yhtäaikainen avautuminen toteutetaan lähes samalla tavalla kuin pelkän paineistimen varoventtiilin avautuminen. MSRT:n automaatiovika on toteutettu poistamalla simuloinnista laskennan alussa venttiilin toimilaitetta edeltävä katkaisija. Tällöin automaatio ei pysty säätämään venttiiliä, mutta turvallisuustoiminto, joka sulkee venttiilin sekundääripiirin paineen alittaessa 40 baaria, säilyy toiminnassa. Alkutapahtumassa paineistimen varoventtiilin lisäksi avataan MSRT:n eristysventtiilit. Ulkoisen verkon menetyksen ajankohta on selvitetty samalla tavalla kuin paineistimen varoventtiilin avautumisessa. Alkutapahtuman jälkeen laskenta on sama kuin paineistimen varoventtiilin avautumisessa.

6 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

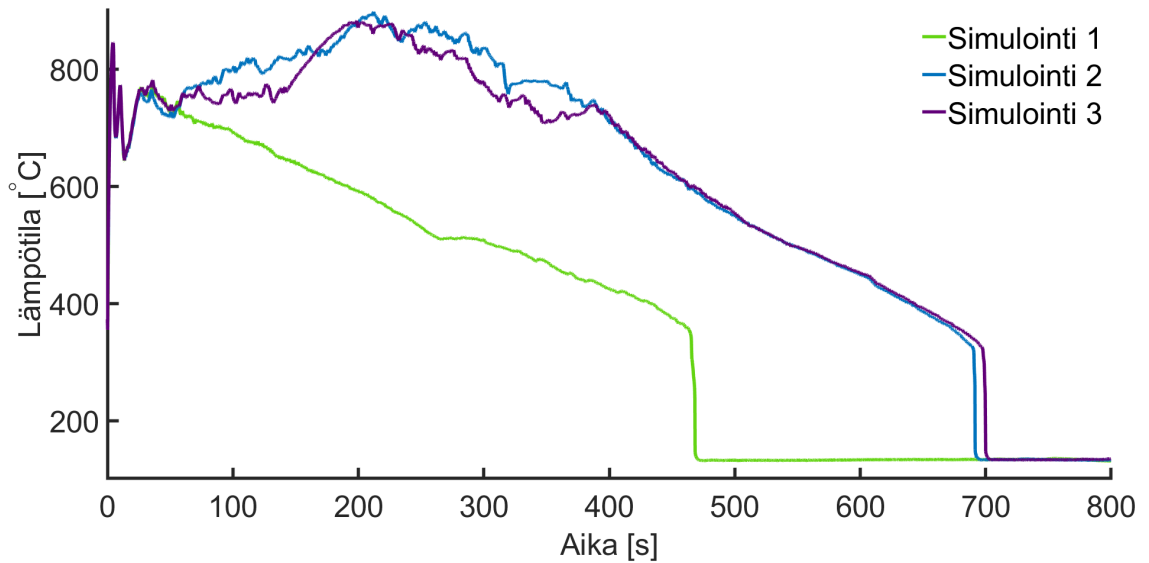
Tulokset esitetään tapauskohtaisesti. Ensimmäisestä laskentatapauksesta tarkastellaan suojakuoren maksimilämpötilan riippuvuutta laskentakanavien virtausolosuhteista. Toisesta laskentatapauksesta tarkastellaan primääri- ja sekundääripiirin painetta, vuotovirtausta, hätäjähdytysvirtausta ja suojakuoren maksimilämpötilaa. Näitä vertaillaan laitostoimittajan analyysin tuloksiin. Kolmannesta laskentatapauksesta tarkastellaan pitkälti samoja tuloksia kuin edellisessä tapauksessa. Tuloksia vertaillaan sekä laitostoimittajan analyysin tuloksiin että kokeellisiin tuloksiin. Johtopäätökset ja kehitysehdotukset esitetään kaikkien laskentatapausten perusteella.

6.1 Tapaus 1: 2A-LOCA

Laskentatapaus 1 toistettiin samalla Apros-malliversiolla, samasta alkutilasta ja samalla simulointitiedostolla kolme kertaa. Tällöin ainoa eron aiheuttaja lämpötilatuloksissa oli alkutilan pienet muutokset laskennan alustuksessa, mitkä vaikuttavat virtauksen käyttäytymiseen monikanavareaktorissa. Kuvassa 6.1 on esitetty suojakuoren maksimilämpötila näistä kolmesta simuloinnista. Korkein lämpötila on saatu laskentakanavan 1 kuumasta sauvasta. Lämpötila käyttäytyy ulospuhallusvaiheen aikana lähes samalla tavalla, mutta tämän jälkeen syntyy huomattavia eroja.

Ensimmäinen lämpötilahuippu kaikissa simuloinneissa on noin 845 °C. Ensimmäisessä simuloinnissa lämpötila alkaa laskemaan toisen lämpötilahuipun jälkeen, kun taas muissa tapauksissa syntyy vielä kolmas korkeampi lämpötilahuippu. Lämpötilatuloksien vaihtelu johtuu ilmeisesti virtauksen käyttäytymisestä ylätukilevyssä. Jäähdytettä kertyy ylätilaan CCFL-ilmiön rajoittaessa veden virtausta sydämeen. Koska ilmiö on hyvin kaoottinen ja veden virtaus alaspäin voi vaihdella polttoaine-elementistä toiseen, tämä ilmiö näkyy monikanavamallilla mallinnettaessa kanavakohtaisesti vaikuttaen merkittävästi laskentatuloksiin kanavien suurten virtauspoikkipinta-alojen vuoksi. Liitteessä D on kuvattu suojakuoren maksimilämpötila eri laskentakanavissa ja massavirtojen suuruudet niiden yläpuolella yhtä polttoaine-elementtiä kohden. Jokaisen laskentakanavan yläpuolella on haaran jälkeen laskentanoodi, josta on haara sekä viereisen kanavan yläpuoliseen laskentanoodiin että ylätukilevyä kuvaavaan haaraan, josta massavirrat on otettu tuloksiin.

Ylätukilevyn haaroissa massavirran ollessa negatiivinen, virtaus on reaktoriin päin eli



Kuva 6.1. Suojakuoren maksimilämpötila kuumassa sauvassa, perusmalliversio.

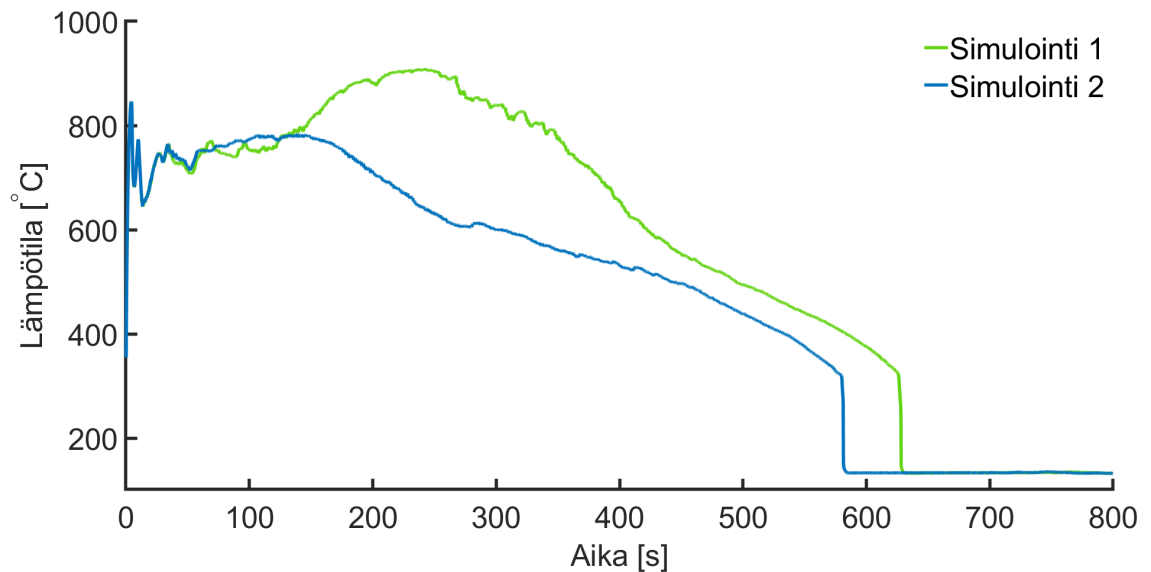
alaspäin ja positiivinen virtaus on kohti ylätilaa. Ensimmäisessä simuloinnissa virtaus reaktoriin päin on suurta kanavassa 6, kuten kuvasta D.11 voi nähdä. Lisäksi kuvien D.13, D.15 ja D.17 perusteella kanavien 7, 8 ja 9 yllä virtaus on suurempaa verrattuna muihin simuloiteihin. Reunimmaisissa kanavissa polttoaineen ja suojakuoren lämpötilat ovat pienempiä verrattuna keskellä oleviin kanaviin, kuten liitteen D lämpötilakuvista voi nähdä. Kanava 6 on poikkialtaan reaktorin laskentakanaavista suurin, joten se mahdollistaa tehokkaan jäähdytyskierron reaktorin läpi parantaen näin muidenkin kanavien jäähdytystä ristivirtauksien kautta ja näin tuloksena on matalampi suojakuoren maksimilämpötila.

Toisen simuloinnin alussa virtaus reaktoriin päin tapahtuu kanavasta 4, kuten kuvasta D.7 voi huomata, ja suojakuoren lämpötila kasvaa korkeimmaksi tässä simuloinnissa. Myös validointiraportin perusteella tällaisessa tilanteessa suojakuoren lämpötila näyttäisi kasvavan korkeaksi, sillä myös tässä tapauksessa virtaus on reaktoriin päin käytännössä koko ajan kanavasta 4 [36]. Tämä kanava on pienempi kuin kanava 6 ja lähempänä reaktorin keskustaa, joten siinä suojakuoren lämpötilat ovat korkeampia kuin reunempana sijaitsevilla matalan tehon kanavissa. Muidenkin kanavien jäähdytyskierto on vastaavasti heikompi kuin kanavan 6 aiheuttamassa tehokkaammassa kierrossa.

Viimeisessä simuloinnissa suojakuoren maksimilämpötila nousee lähes yhtä korkeaksi kuin toisessa simuloinnissa. Alkuun lämpötila ei nouse juuri ollenkaan toisen lämpötilahuipun jälkeen. Samaan aikaan virtaus reaktoriin päin on kanavasta 6, mutta se ei ole yhtä suurta kuin ensimmäisessä simuloinnissa. Tämä saattaisi selittää, miksi suojakuoren lämpötila ei lähde laskemaan. Tämän lisäksi virtausta reaktoriin päin tapahtuu myös kanavasta 1, kuten kuvasta D.1 voi nähdä. Liitteen D lämpötila- ja massavirtakuvaajia vertailemalla voi huomata, että kanavan virtaus alaspäin jäähdyttää kyseistä kanavaa selkeästi. Lämpötila lähtee nousemaan nopeasti vähän sen jälkeen, kun virtaus reaktoriin päin vaih-

tuu kanavasta 6 kanavaan 2, minkä voi nähdä kuvasta D.3. Kanava 2 on poikkialtaan laskentamallin toiseksi pienin kanava, jolloin sen kautta kulkeva virtaus on varsin pientä ja jäähdytysvaikutus on siten heikkoa, mikä selittää osaltaan nopean lämpötilan nousun.

Ensimmäinen laskentatapaus testattiin myös malliversiolla, johon on mallinnettu polttoaine-elementtien säätösauvojen ohjausputket erillisinä virtauskanavina. Tapaus simuloitiin kaksi kertaa ja kuvassa 6.2 on esitetty molempien tapausten suojakuoren maksimilämpötila. Tässäkin esiintyy samalla tavalla vaihtelua, kuten perusmallissa, ja lämpötila korreloi kanavien massavirtojen kanssa. Liitteessä E on esitelty näistä simuloinneista suojakuoren maksimilämpötila laskentakanaavissa ja massavirrat niiden yllä.



Kuva 6.2. Suojakuoren maksimilämpötila kuumassa sauvassa, malliversiossa ohjausputket.

Ensimmäinen simulointi johtaa vähän yli 900 asteen maksimilämpötilaan. Alkuun massavirrat käyttäytyvät hyvin samalla tavalla kuin perusmalliversion kolmannessa simuloinnissa. Alussa virtaus on reaktoriin päin kanavasta 6, kuten kuvassa E.11 nähdään, mikä estää lämpötilan nousun 100 sekunnin paikkeilla. Virtaus vaihtuu reaktoriin päin kanavasta 2, minkä voi huomata kuvasta E.3, suunnilleen samaan aikaan kuin perusmalliversion kolmannessa simuloinnissa, jolloin lämpötila nousee nopeasti. Tässä tapauksessa virtaus pysyy reaktoriin päin kanavasta 2 pidemmän aikaa, mikä mahdollisesti aiheuttaa korkeamman maksimilämpötilan. Toisessa simuloinnissa suojakuoren lämpötila jää huomattavasti matalammaksi, mikä johtuu ilmeisesti siitä, että virtaus reaktoriin tapahtuu kanavasta 5, kuten kuvasta E.9 voi nähdä. Tämä ei ole yhtä iso kanava kuin kuudes kanava, jolloin virtaus ei ole yhtä suurta eikä jäähdytys yhtä tehokasta verrattuna tilanteeseen, jossa kanavasta 6 virtaa vettä reaktoriin päin.

Kuvan 6.2 toinen simulointi testattiin myös käyttämällä Aproksen toimintoa, jonka kuu-
luisi estää termohydrauliseen laskentaan liittyvien tilasuureiden ja niistä riippuvien suu-

reiden muuttuminen alustuksen aikana [4]. Mallin alkutila ja malli itsessään tallennettiin toiminnon ollessa käytössä ja molemmilla kerroilla malli ladattiin Aproxseen uudestaan ja toteutettiin täysin sama laskenta. Vaikka toiminto ei aiempien tarkastelujen perusteella ole estänyt tilasuureiden muuttumista alustuksissa, tässä tapauksessa toiminnon ollessa käytössä alustus vaikutti identtisesti ja tällä tavoin molemmista simuloinneista saatiin täysin samanlainen tulos suojakuoren maksimilämpötilalle.

6.2 Tapaus 2: Paineistimen yhdyslinjan katko

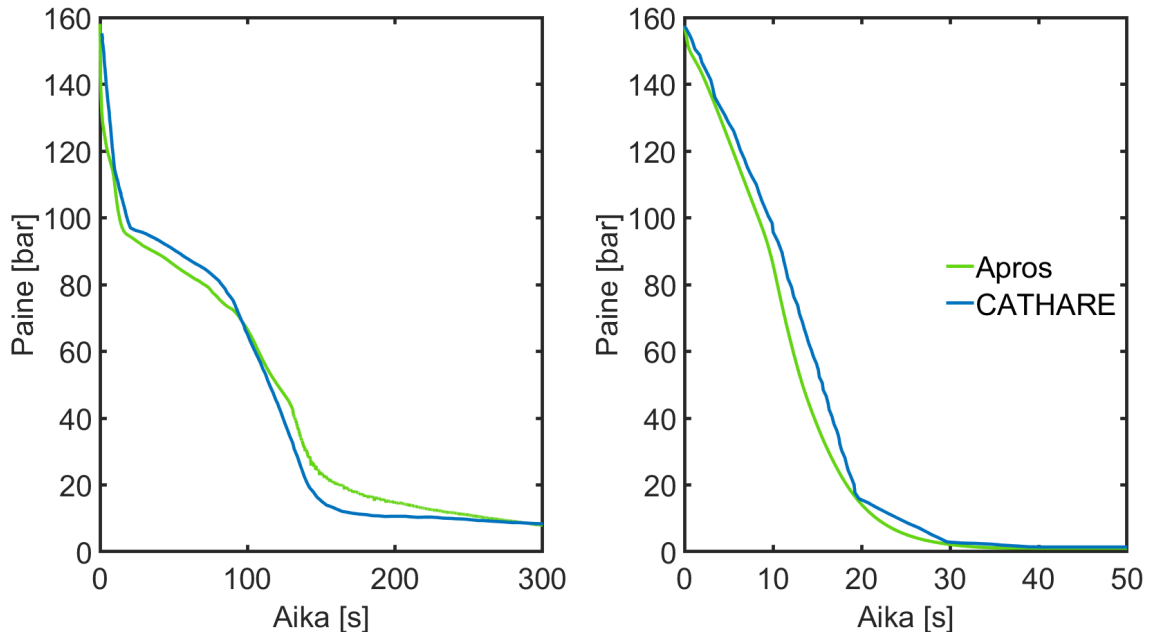
Toista laskentatapausta vertaillaan laitostoimittajan analyysiin. Taulukossa 6.1 on esitetty onnettomuuden tapahtumasarja sekä laitostoimittajan analyysistä CATHAREn laskemana että Aproxsen laskemana.

Taulukko 6.1. *Tapahtumasarja toisessa laskentatapauksessa alkaen alkutapahtumasta, vertailu laitostoimittajan analyysiin [10, s. 44].*

Tapahtuma	CATHARE	Apros
Paineistimen paine alle min2p	4,6 s	4,0 s
Reaktorin pikasulku	6,0 s	5,3 s
Turbiinin pikasulku	8,1 s	7,3 s
Paineistimen paine alle min3p	8,1 s	7,9 s
Osittainen jäähdytys alkaa	10,9 s	35,8 s
Pääkiertopumput pysähtyvät	25,5 s	27,3 s
MHSI-syöttö alkaa	69,8 s	70,2 s
Akkusyöttö alkaa	120,3 s	124,6 s
LHSI-syöttö alkaa	140,8 s	165,6 s
Osittainen jäähdytys loppuu	466,9 s	-

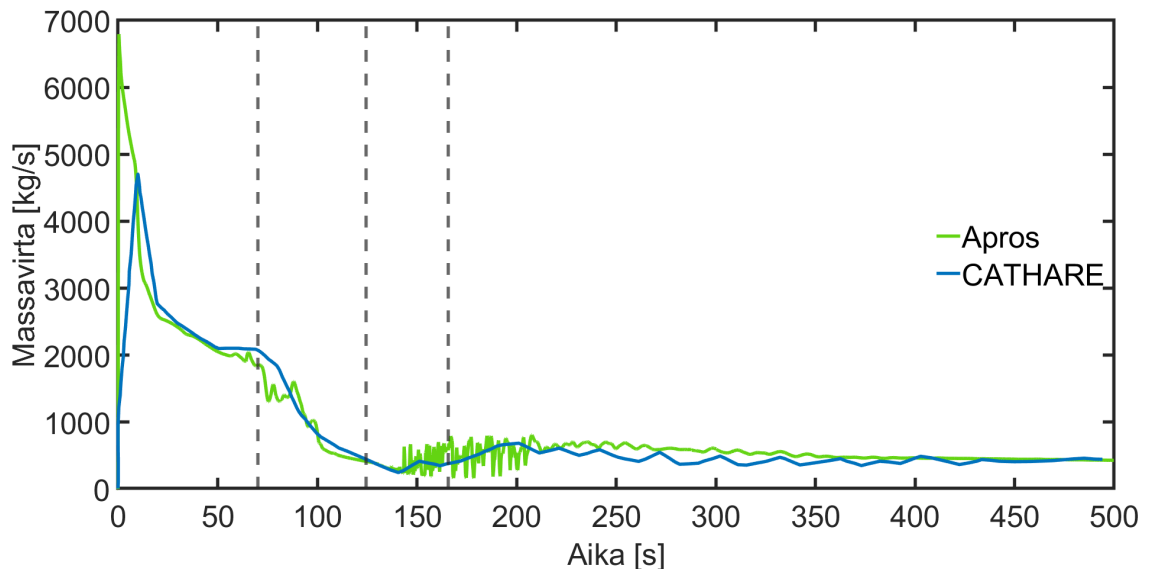
Apros-tuloksissa paine paineistimessa ja primääripiirissä laskee hiukan nopeammin minikä vuoksi reaktorin pikasulku ja hätäjäähdytys käynnistyvät aikaisemmin kuin laitostoimittajan analyysissä. Turbiinin pikasulku on riippuvainen vain automaation viiveistä reaktorin pikasulun jälkeen, joten paineen lasku vaikuttaa tämänkin aikaisempaan alkamiseen. Kuvassa 6.3 on esitetty primääripiirin ja paineistimen paine. Primääripiirin paine on Apros-tuloksissa keskiarvo kuumien haarojen paineesta. Edellä mainittujen toimintojen käynnistymisessä ei ole merkittävää eroa, sillä painekäyttäytyminen on hyvin samanlaista molemmissa analyyseissä.

Apros-tuloksissa paine laskee nopeammin, sillä Aproxella laskettu vuotovirtaus on alussa selkeästi suurempi kuin laitostoimittajan analyysissä. Vuotokohdassa virtaus on alussa kriittinen, joten todennäköisesti ero johtuu kriittisen virtauksen laskennasta. CATHAREssa käytetään erilaista korrelaatiota kriittisen virtauksen määrittämiseen kuin Aproxessa [42]. Laitostoimittajan analyyseissä datapisteitä on kerätty syötetiedoston mukaan ku-



Kuva 6.3. Primääripiirin ja paineistimen paine, huomaa eri aika-akselit. Laitostoimittajan tulokset lähteestä [10, s. 69].

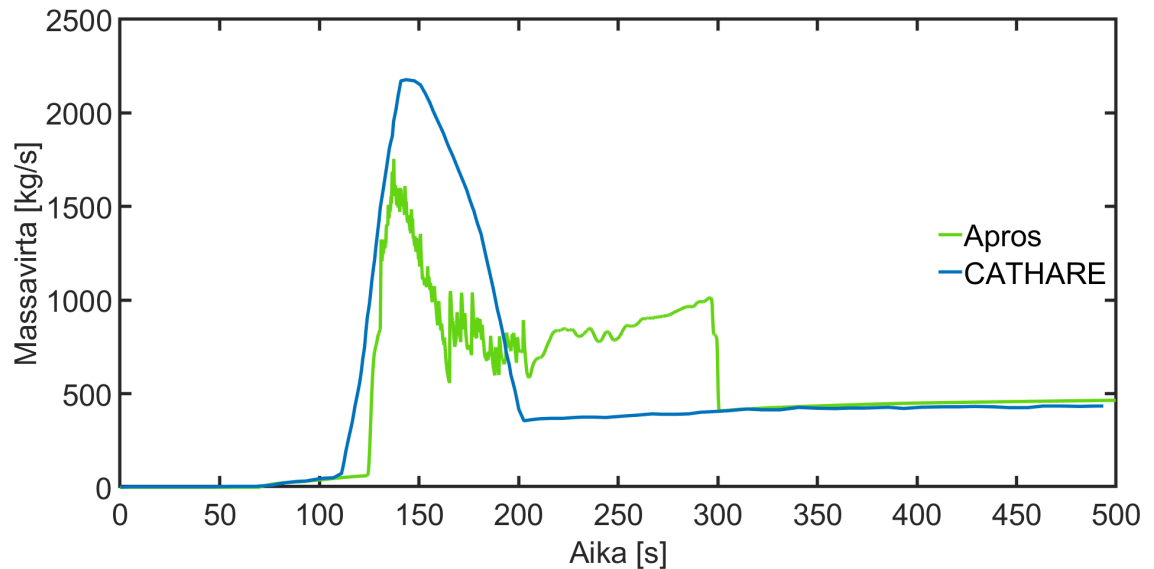
vaajiin 10 sekunnin välein, kun taas Aproksen laskentaan datankeräys on asetettu 0,2 sekunnin välein. Kuvaajan epätarkkuus vaikuttaa luultavasti osaltaan vuotovirtauksen maksimiarvon eroon. Kuvassa 6.4 on esitetty kokonaisvuotovirtaus, jossa on laskettu yhteen sekä paineistimesta että kuuman haaran puolelta vuotava jäähdyte. Vuotovirtauksessa on alkuun selkeä ero, mutta muuten virtaus käyttäytyy hyvin samalla tavalla.



Kuva 6.4. Vuotovirtaus yhteensä paineistimesta ja primääripiiristä, katkoviivoilla merkitty MHSI-syötön, paineakkusyötön ja LHSI-syötön alkaminen Aproksen mukaan, laitostoimittajan tulokset lähteestä [10, s. 70].

Aikavälillä 150 s ja 200 s vuotovirtauksessa on havaittavissa värähtelyä, joka johtuu paineakkujen purkautumisesta. Kokonaishätäjäähdytysvirtausta on verrattu laitostoimittajan

analyysiin kuvassa 6.5. Määrällisesti hätäjähdytysvirtaus on yhtä suuri, mutta Aproksen laskennassa paineakut tyhjenevät selkeästi hitaammin kuin laitostoimittajan analyysissä. Aproksessa paineakkujen typen laajentuminen lasketaan isentrooppisena prosessina ja CATHAREssa adiabaattisena prosessina, joten akkujen paineen laskenta on käytännössä samanlaista. [42]. Paineakun nopeampi purkautuminen laitostoimittajan analyysissä johtuu siis todennäköisesti primääripiirin alhaisemmasta paineesta sillä aikavälillä, kun akut tyhjenevät, kuten kuvasta 6.3 nähdään. Muuten hätäjähdytysyötön ajankohdissa ei ole merkittäviä eroja. LHSI-syötön myöhäisempi alkaminen johtuu primääripiirin paineesta, joka Aproksessa laskee hitaammin paineakkujen purkautumisen aikana.

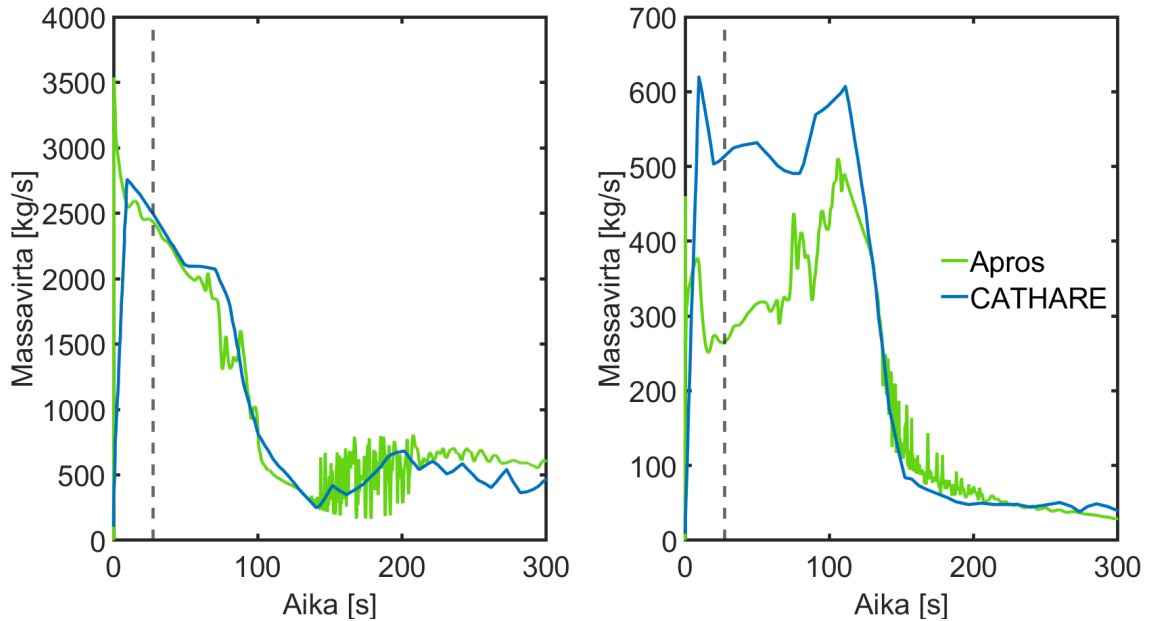


Kuva 6.5. Hätäjähdytysvirtaus yhteensä, laitostoimittajan tulokset lähteestä [10, s. 70].

Suuri värähtely virtauksessa johtuu todennäköisesti alasmenotilan täyttymisestä, joka on hyvin kaoottista ja epäsymmetristä. Kun paineakkuja tarkastellaan erikseen, värähtelypiikit vuorottelevat jossain määrin eri paineakkujen välillä ja virtaus näyttää seuraavan kylmän haaran virtausta, jonne hätäjähdytysyöttö tapahtuu. Alasmenotilan kaoottinen täytyminen aiheuttaa sen, että välillä virtaus puskee väärään suuntaan jossain kylmässä haarassa ja tämä vuorottelee myös haarasta toiseen. Laitostoimittajan syötetiedoston perusteella alasmenotila on mallinnettu huomattavasti yksinkertaisemmin kuin Aproksessa, mikä voi vaikuttaa alasmenotilan täyttymiseen ja siten paineakun virtaukseen.

Vuotovirtaus paineistimen puolelta käyttäytyy hyvin samalla tavalla sekä Aproksessa että laitostoimittajan analyysissä, mutta kuumen haaran puolelta vuotovirtauksessa on eroja. Kuvassa 6.6 on esitetty kokonaisvuotovirtaus kuumen haaran puolelta sekä höyryvirtauksen määrä tästä virtauksesta. Kokonaisvirtauksen suuruudessa ei ole alkuun kovin suurta eroa, mutta höyryvirtaus on laitostoimittajan analyysissä selkeästi suurempi. Höyryn suurempi määrä voi selittyä ylätukilevyn CCFL-korrelaation erilaisilla parametreilla, jotka CATHAREn syötetiedostossa ovat vakioarvoja, mutta Aproksen laskennassa riippuvat höyryn tiheydestä ja nopeudesta. Korrelaatio vaikuttaa siihen, kuinka paljon höyryä

pääsee virtaamaan kohti kuumaa haaraa reaktorista.

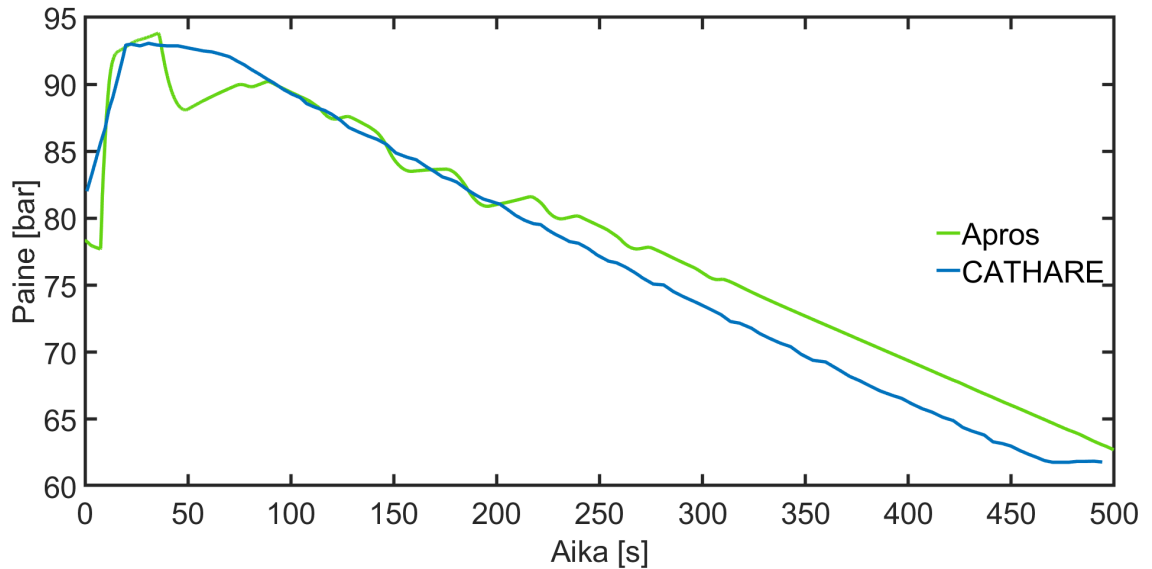


Kuva 6.6. Kokonaisvuotovirtaus sekä höyryvirtaus kuuman haaran puolelta, katkoviivalla merkitty pääkiertopumppujen sähkönmenetyksen ajankohta Aproksen mukaan, laitostoitajien tulokset lähteestä [10, s. 70].

Höyryvirtaus kasvaa pääkiertopumppujen pysähtymisen jälkeen uudestaan kokonaisvuotovirtauksen pysyessä vakiona. Pumppujen pysähtyessä virtaus reaktorissa hidastuu ja faasit pääsevät erottumaan. Koska höyryfaasi asettuu reaktorin yläosaan, höyry pääsee silloin todennäköisesti helpommin virtaamaan vuotavaan kuumaan haaraan. CATHAREN laskennassa vuotovirtaus on sekä höyry- että kokonaisvirtauksen osalta suurempaa noin 20 sekuntia ennen paineakkujen purkautumisen alkamista. Tämä saattaisi selittää, mikä takia paine laskee alemmaksi laitostoitajien analyysissä ja siten myös suuruuseron paineakkujen purkautumisvirtauksessa. Kokonaisvuotovirtauksen kuvassa on kuitenkin sen verran epätarkkuutta, ettei sen perusteella voi tehdä varmoja johtopäätöksiä. Vuotovirtauksen värähtely johtuu alasmenotilan täyttymisestä, joka aiheuttaa virtauksen heilahtelua myös reaktorin puolella ja toisaalta virtauksen suuruuden ja suunnan vaihtelua vuotavassa kuumassa haarassa.

Osittaisen jäähdytyksen toimintaa voidaan tarkastella sekundääripiirin paineen käyttäytymisestä, joka näkyy kuvassa 6.7. Aproksessa paine käyttäytyy varsinkin alkuun eri tavalla. Aluksi paine nousee nopeasti turbiinin pikasulun vuoksi. Paineen nousu hidastuu Aproksen laskennassa pian pikasulun jälkeen, joten höyryn ulospuhallus alkaa myöhemmin. Aproksen tapauksessa paine putoaa nopeasti osittaisen jäähdytyksen alkaessa. Tämä johtuu siitä, että ulospuhalluslinjan eristysventtiilien ajoaika on 0,3 sekuntia kun taas tämän jälkeisen säätöventtiilin ajoaika on 40 sekuntia ja säätöventtiili on osittain auki eristysventtiilin avautuessa. Myöhempi värähtely johtuu siitä, että höyryä puhalletaan välillä syöttövesisäiliöön paineen säätämistä varten ja CATHAREssa tätä toimintoa ei ole mal-

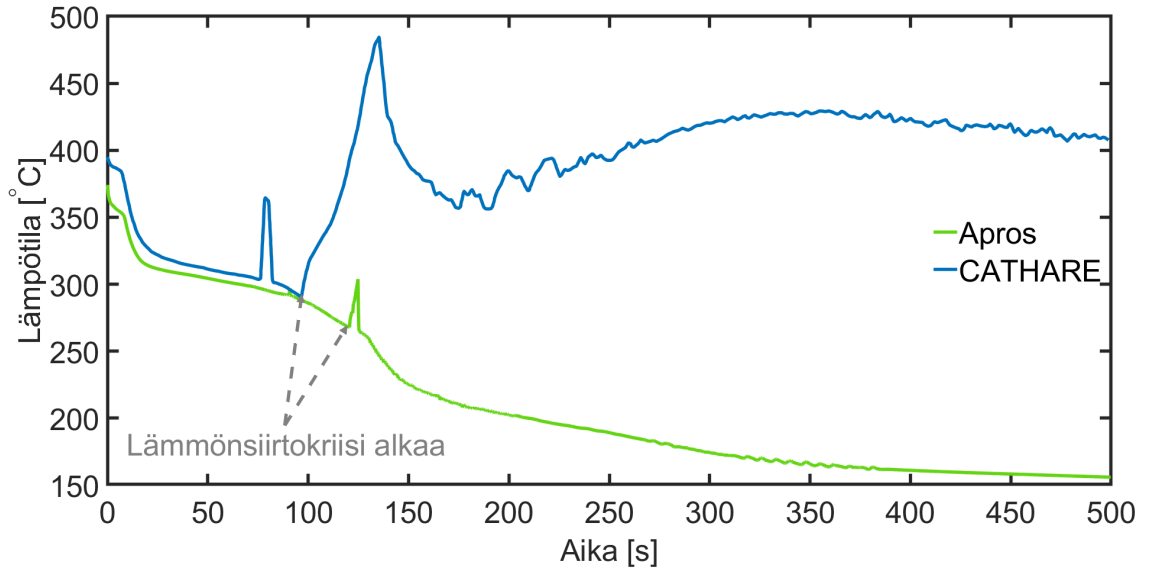
linnettu. Kuvan 6.7 perusteella näyttäisi siltä, että Aproksessa paineen lasku tapahtuu hitaammin kuin CATHAREssa. Laitostoimittajan syötetiedostosta käy ilmi, että osittaisen jäähdytyksen asetusarvon laskenta on toteutettu aikariippuvaisella funktiolla, jonka perusteella on muutettu reunaehtoina toimivien ulospuhallusventtiilien ominaisuuksia. Mallinnustapa saattaa siis selittää eroja paineen laskussa. Kuitenkin paineen hitaampi lasku on konservatiivisempi, sillä tämä johtaa hitaampaan primääripiirin jäähdytykseen.



Kuva 6.7. Sekundääripiirin paine, laitostoimittajan tulokset lähteestä [10, s. 69].

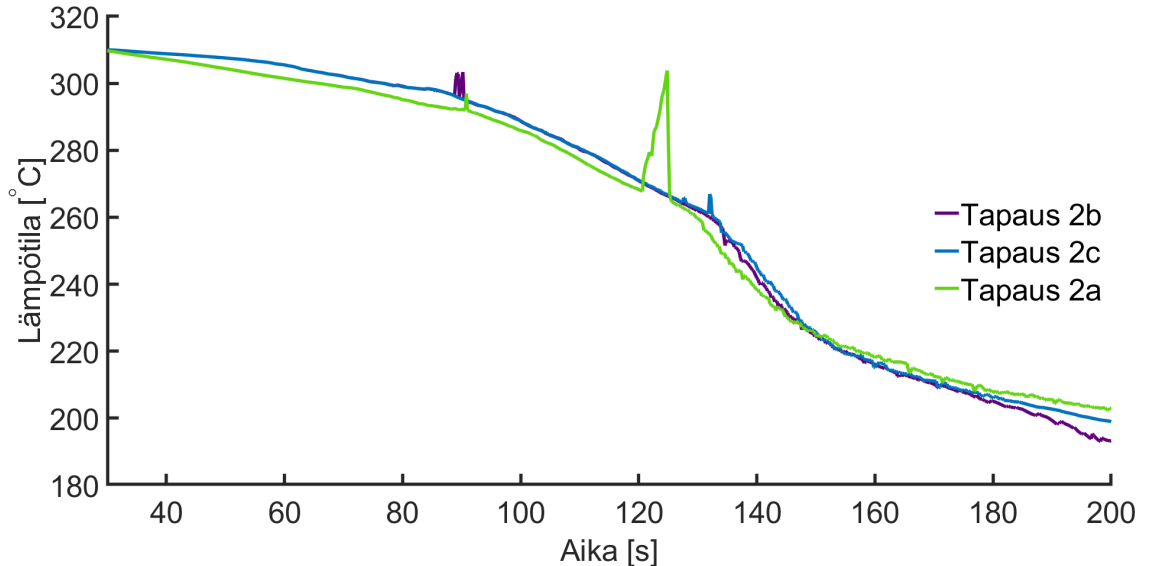
Suojakuoren maksimilämpötila on esitetty kuvassa 6.8. Vaikka muissa tuloksissa ei ole suuria eroja, suojakuoren maksimilämpötila jää selkeästi matalammaksi verrattuna laitostoimittajan analyysiin. Alkuun lämpötila seuraa hyvin laitostoimittajan analyysiä lukuun ottamatta aiempaa lämpötilapiikkiä, mutta lämmönsiirtokriisin ajoittuminen ja kesto poikkeavat selkeästi. Todennäköisin syy suurelle erolle on analyysissä käytetyt eri kriittisen lämpövuon korrelaatiot. Lisäksi kiehun vaihe määritetään hieman eri tavalla CATHAREssa. Molemmat erot vaikuttavat siihen, milloin ja kuinka kauan polttoaine on lämmönsiirtokriisissä. [42] Aproksen laskennassa kuuma sauva joutuu hetkellisesti lämmönsiirtokriisiin, mikä näkyy kuvassa 6.8 pienenä lämpötilapiikkinä. Piikki ajoittuu samalla tavalla kuin CATHAREssa, mikä myös viittaa siihen, että eron aiheuttaa kriittisen lämpövuon korrelaatio sekä kriisiin joutuneen sauvan nopeampi uudelleen kastuminen.

Suojakuoren maksimilämpötilaa vertailtiin myös muilla vika- ja ennakkohuoltoyhdistelmillä laskettuna. Oletus ulkoisen verkon menetyksestä ja käytössä olevat järjestelmät on esitetty taulukossa 5.5. Oletettavasti tapauksissa 2b ja 2c, joissa ulkoisen verkon menetys on oletettu, pääkiertopumppujen aikaisempi pysähtyminen nostaa suojakuoren lämpötilaa verrattuna tapaukseen 2a, jossa verkko pysyy käytössä. Ero on havaittavissa onnettomuuden alkuvaiheessa. Kuvassa 6.9 on esitetty suojakuoren maksimilämpötila näissä tapauksissa alkaen 30 sekuntia alkutapahtuman jälkeen. Sitä ennen lämpötilassa ei juuri ole eroa. Tapauksessa 2b kuuma sauva joutuu hetkellisesti lämmönsiirtokriisiin noin 90



Kuva 6.8. Suojakuoren maksimilämpötila kuumassa sauvassa, kuvaan merkitty molemmissa tapauksissa lämmönsiirtokriisin alkamishetki, laitostoimittajan tulokset lähteestä [10, s. 71].

sekuntia onnettomuuden alun jälkeen ja tapauksessa 2c noin 130 sekuntia alun jälkeen. Näiden aiheuttamat lämpötilapiikit jäävät pienemmiksi kuin varsinaisessa vertailutapauksessa.

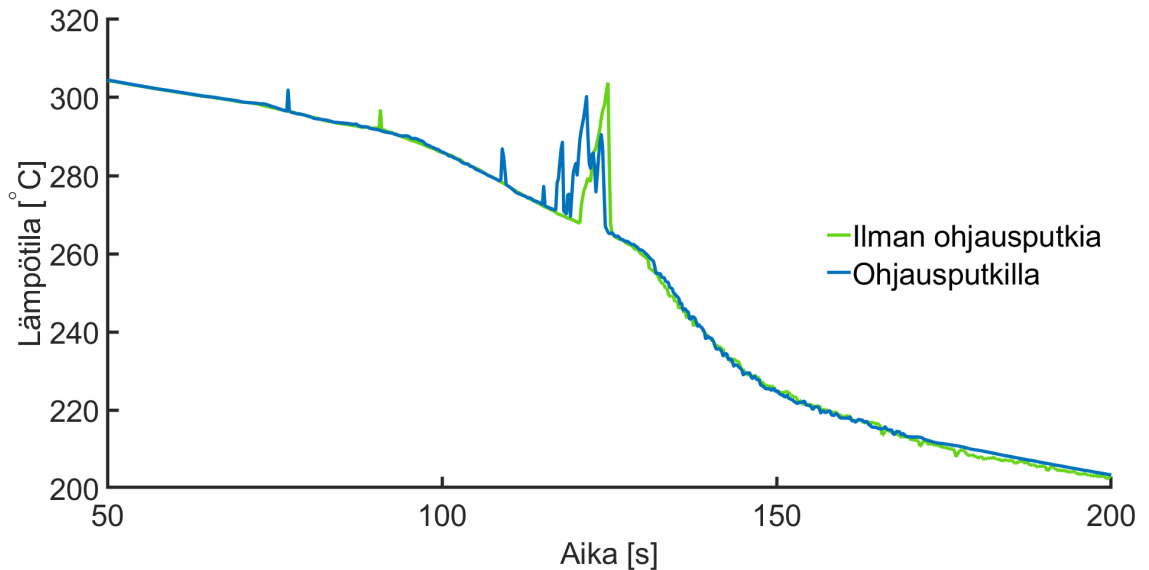


Kuva 6.9. Suojakuoren maksimilämpötila kuumassa sauvassa eri vika- ja ennakkohuoltoyhdistelmillä.

Tämän perusteella ei voida varmasti todeta, että tapaus 2a aiheuttaisi suurimman lämpötilapiikin. Laskentaa testattiin useita kertoja, jolloin huomattiin, että lämmönsiirtokriisin kesto vaihtelee samaa tapausta laskettaessa ja toisinaan kuuma sauva ei joudu lämmönsiirtokriisiin ollenkaan. Lämmönsiirtokriisin lyhyt kesto ja alkutilan pieni vaihtelu laskennan alustuksessa saattaa muuttaa tuloksia ja hankaloittaa näin vikayhdistelmien vertailua. Eri

kriittisen lämpövuon korrelaatiolla voisi olla mahdollista saada ero selkeämmin näkyvään eri tapausten välillä. Tällöinkin jokaisen tapauksen laskenta olisi toistettava useaan kertaan, jotta jokaisesta tapauksesta saataisiin edustava tulos vertailtavaksi.

Laskentatapausta 2a testattiin myös monikanavamalliversiolla, johon ei ole mallinnettu ohjausputkia. Mallien alkutilat on simuloitu samalla tavalla ja simulointitiedostot ovat samat, joten ainoa ero on ohjausputket tai niiden puuttuminen. Kuvassa 6.10 on esitetty suoja kuoren maksimilämpötila molemmilla malliversioilla laskettuna.



Kuva 6.10. Suoja kuoren maksimilämpötila kuumassa sauvassa eri malliversioilla.

Kuvan perusteella toisella malliversiolla ei saada korkeampaa lämpötilapiikkiä, mutta piikkejä on useampia. Muut tulokset eivät käytännössä poikkea toisistaan. Ohjausputkettomalla malliversiolla tehtiin myös useampi testisimulointi, ja toisinaan kuuma sauva ei joutunut lämmönsiirtokriisiin ollenkaan. Tässä siis oli havaittavissa sama vaihtelu kuin perusmalliversiossa. Tässäkin eron malliversioiden välillä voisi mahdollisesti saada näkyviin eri kriittisen lämpövuon korrelaatiolla, mutta se vaatisi molempien tapausten toistamista useaan kertaan, kuten eri vikakonfiguraatioiden tapauksessa.

Kemikaalien- ja tilavuudensäätojärjestelmän sulkeminen sulkuventtiileillä korjattiin vasta silloin, kun toinen laskentatapaus oli jo laskettu, joten tästä tapauksesta se jäi pois. Massavirta järjestelmästä pääkiertopiiriin on yhtä suuri kuin virtaus piiristä järjestelmään ja massavirrat ovat pieniä (n. 13 kg/s) verrattuna pääkiertovirtaukseen (yli 5000 kg/s) joten vaikutus tuloksiin ei ole merkittävä. Tämä tuli todettua myös jälkepäin testaamalla tapausta 2a. Lisäksi osittaisen jäähtytyksen paineen asetusarvon alaraja olisi pitänyt korjata analyysiraportin mukaan 1,5 baaria korkeammaksi, mutta tälläkään ei olisi ollut vaikutusta lopputulokseen, sillä Aproksessa osittainen jäähtytys ei ehdi laskea painetta niin alas ennen laskennan loppua [10, s. 24].

6.3 Tapaus 3: PSV:n avautuminen sekä PSV:n ja MSRT:n yhtäaikainen avautuminen

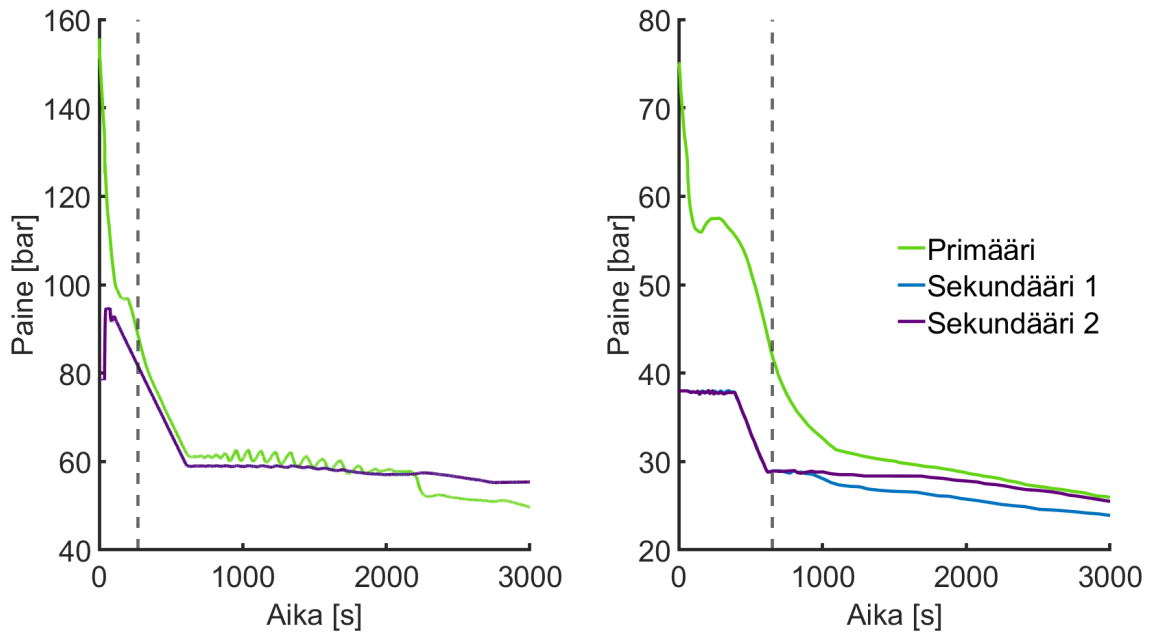
Paineistimen varoventtiilin avautumista vertaillaan sekä koetuloksiin että laitostoimittajan analyysiin. Tuloksia käytetään vertailukohtana varsinaiselle laskentatapaukselle, jossa avataan lisäksi MSRT-venttiilit. Laitostoimittajan analyysissä alkutila on lähes sama kuin toisessa laskentatapauksessa, mutta toimintojen käynnistymisten suhteen on joitakin eri oletuksia. Taulukossa 6.2 on esitetty koetulosten, laitostoimittajan analyysin ja Aproksen laskennan tapahtumasarja paineistimen varoventtiilin avautumiselle.

Taulukko 6.2. Tapahtumasarja kolmannessa laskentatapauksessa (vain PSV) alkaen alkutapahtumasta, vertailu laitostoimittajan analyysiin ja koetuloksiin [22, s. 14][59].

Tapahtuma	Koe	CATHARE	Apros
Paineistimen paine alle min2p	-	41,5 s	33,4 s
Reaktorin pikasulku	52 s	43,0 s	34,7 s
LOOP alkaa	76 s	(45,1 s)	48,8 s
Paineistimen paine alle min3p	-	80,2 s	61,5 s
Paineistimen lämmitin pois	145 s	-	153,6 s
Osittainen jäähdytys alkaa	391 s	81,2 s	76,0 s
EFWS-syöttö alkaa	-	138,2 s	125,6 s
Osittainen jäähdytys loppuu	611 s	538,3 s	594,9 s
MHSI-syöttö alkaa	650 s	275,1 s	271,0 s

Vertaillaan ensin koetuloksia. Pikasulku ja ulkoisen verkon menetys alkavat aiemmin Aproksen laskennan mukaan. Molemmat ovat riippuvaisia primääripiirin paineesta ja kuten kuvasta 6.11 voi nähdä, Aproksen laskennassa paine laskee primääripiirissä selkeästi nopeammin. Kuvassa on esitetty primääripiirin ja sekundääripiirin paine. Näistä "sekundääri 1" kuvaa sitä kiertopiiriä tai piirejä, joihin hätäjäähdytysvesi primääripiirin puolella ja hätäsyöttövesi sekundääripiirin puolella syötetään ja "sekundääri 2" sitä kiertopiiriä tai piirejä, joihin ei. Höyryn muodostuminen ei nosta primääripainetta Aprosan analyysissä yhtä paljon kuin koetuloksissa. Primääripaine käyttäytyy kuitenkin koetuloksissa samalla tavalla kuin Aproksella lasketuissa esilaskentatuloksissa, joten paineen nousu voi johtua koelaitteiston ominaisuuksista. Esimerkiksi koelaitteiston tilavuudet suhteessa komponenttien korkeuksiin ovat huomattavasti pienempiä verrattuna referenssilaitokseen, jolloin myös seinäpinta-alaa suhteessa tilavuuteen on paljon enemmän, mikä vaikuttaa esimerkiksi virtauksien käyttäytymiseen [59].

Sekundääripiirin paine alkaa nousemaan turbiinin pikasulun jälkeen, minkä takia osittainen jäähdytys alkaa huomattavasti aikaisemmin Aprosan tuloksissa. Sekundääripaine saavuttaa tällöin nopeammin osittaisen jäähdytyksen laskevan asetusarvon. Koejärjestelyssä



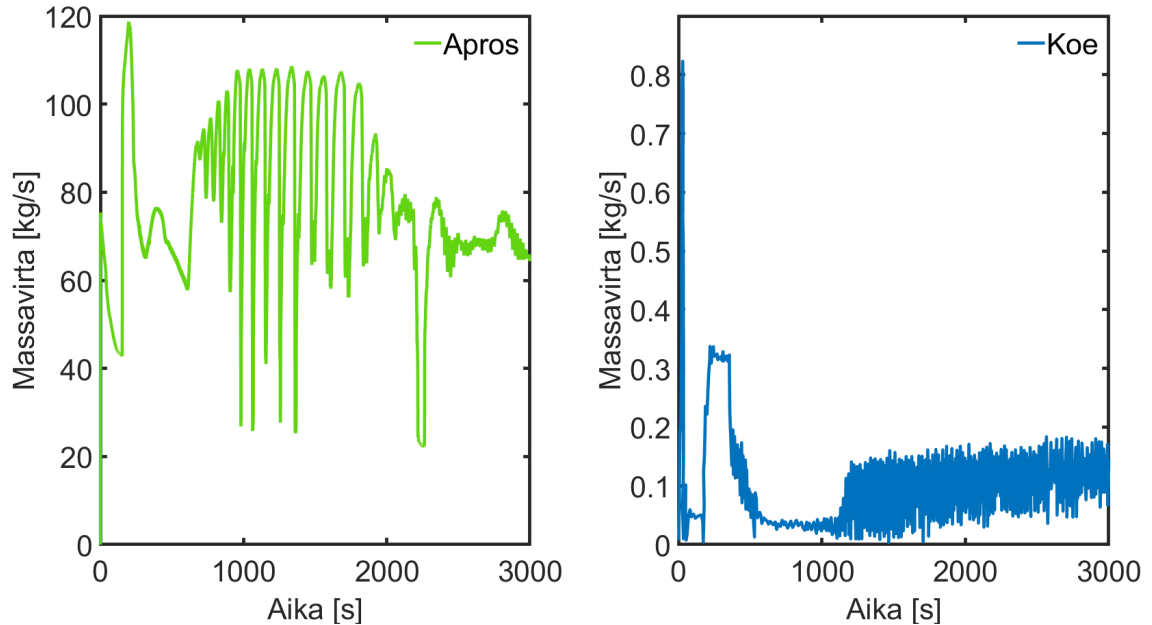
Kuva 6.11. Primääri- ja sekundääripaine Aproksella laskettuna ja koetuloksissa. Koetuloksissa paineet on skaalattu koelaitteiston mukaisesti [59]. Katkoviivalla on merkitty MHSI-syötön alkamisen ajankohta Aproksessa ja koetuloksissa. Koetulokset lähteestä [59].

osittainen jäähditys on aloitettu hätäjäähdityssignaalista, joka on riippuvainen primääripiirin paineesta. Koska primääripiirin paine laskee hitaammin, osittainen jäähdityskin alkaa myöhemmin. Sekundääripiirin paineen käyttäytyminen saattaa siis selittää joitakin eroja myös primääripiirin paineen käyttäytymisessä, sillä osittainen jäähditys laskee primääripiirin painetta. Koelaitteiston sekundääripiiri ei ole suljettu, vaan höyrystimiin syötettävä vesi puhalletaan höyrystimien jälkeen yhden putkilinjan kautta ulos [37, s. 17]. Turbiinin pikasulun vaikutusta sekundääripiirin paineeseen ei ole koejärjestelyssä huomioitu, minkä takia koetuloksissa paine pysyy vakiona ennen osittaista jäähditystä.

Aproksessa hätäsyöttöä syötetään kiertopiirien 1 ja 4 höyrystimiin. Kokeessa on syötetty vettä sekundääripiiriin niin, että höyrystimien pinta pysyy vakiona, joten ero paineissa todennäköisesti selittyy primääripiirillä. Vuodon ollessa vain yhdessä kiertopiirissä painestimen kautta, pääkiertopiirien virtaukset ja paine käyttäytyvät epäsymmetrisesti höyrystimissä, mikä voi vaikuttaa myös sekundääripiirin puolelle. Aproksen sekundääripiirissä hätäsyöttöä säädellään höyrystimen paineen mukaan, jolloin kiertopiireissä 1 ja 4 höyrystimen pinnankorkeus nousee huomattavasti verrattuna niihin kiertopiireihin, joihin hätäsyöttöä ei syötetä. Höyrystimien paineet pääsevät tasoittumaan päähöyrylinjojen jakotukin kautta, minkä takia Aproks-tuloksissa kaikkien kiertopiirien paine sekundääripiirissä pysyy samana.

Aproksessa primääripiirin paine laskee nopeasti noin 2200 sekunnin kohdalla alle sekundääripiirin paineen. Paineen lasku ei liity sekundääripaineeseen, mutta vuotovirtaus todennäköisesti selittää romahduksen. Kuvassa 6.12 on esitetty kokonaisvuotovirtaus

Aproksen laskemana sekä koetuloksissa. Koetuloksissa ensimmäinen piikki on huomattavasti korkeampi suhteessa muuten vuotovirtaukseen kuin Apros-tuloksissa. Tätä lukuun ottamatta virtaukset käyttäytyvät samalla tavalla. Toisen piikin jälkeen virtaus pienenee, jonka jälkeen virtauksessa on paljon värähtelyä.



Kuva 6.12. Kokonaisvuotovirtaus Aproksella laskettuna ja koetuloksissa. Koetuloksissa vuotovirtauksen poikkipinta-ala on skaalattu koelaitteiston mukaisesti [59]. Koetulokset lähteestä [59].

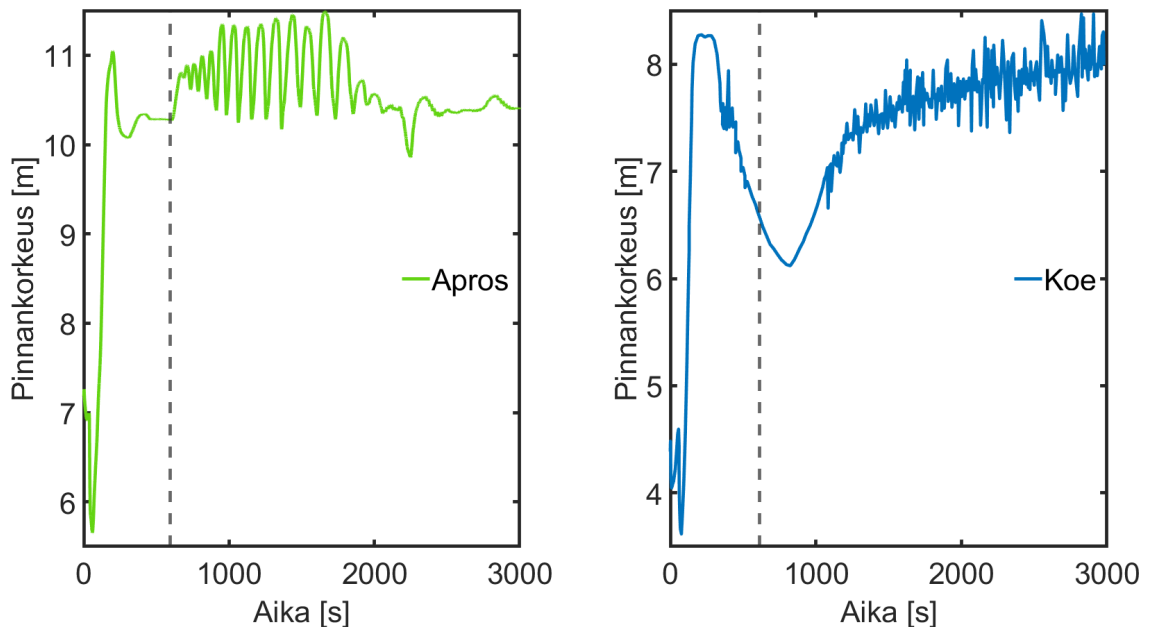
Värähtely virtauksessa vaikuttaa johtuvan eri asioista Aproksessa ja koetuloksissa. Aproksen tapauksessa värähtely alkaa samaan aikaan kuin osittainen jäähdytys loppuu, jolloin myös paineen lasku loppuu primääripiirissä. Koetuloksissa ei esiinny samanlaista ilmiötä, koska primääripiirin paine jatkaa vielä laskua sen jälkeen, kun osittainen jäähdytys on lopunut. Toisaalta Aproksen tapauksessa virtauksen värähtely on jaksoltaan huomattavasti hitaampaa kuin koetuloksissa.

Värähtely vaikuttaa johtuvan höyryn muodostumisesta reaktorissa. Höyry ei pääse virtaamaan suoraan reaktorista ylätilaan ja kuumiin haaroihin, vaan se kertyy laskentanoodeihin. Ylätukilevyn ja kuumien haarojen välinen tila on mallinnettu kolmella päällekkäisellä laskentanoodilla ja -haaralla ennen jakoa kahdeksaan sektoriin. Reaktorissa syntyvä höyry varastoituu kerralla yhteen noodiin, kunnes sitä on kertynyt tarpeeksi, jolloin se purkautuu seuraavaan noodiin. Samanlainen värähtely on havaittavissa laskentakanavien pinnankorkeuksissa sekä kuumien ja kylmien haarojen virtauksissa. Virtauksen kasvaessa pääkiertopiireissä 2 ja 4, pääkiertopiirissä 3 virtaus muuttaa suuntaa ylätilaa kohti, jolloin paineistimen yhdyslinjassa virtaus kääntyy pois päin paineistimestä. Pinnan korkeus laskee paineistimessa aiheuttaen vuotovirtauksen romahtamisen. Tämä toistuu värähtelyn mukaisesti, kunnes loppuvaiheessa laskentaa vuotovirtaus tasoittuu.

Vuotovirtauksen romahtaminen noin 2200 sekuntia onnettomuuden alun jälkeen vaikuttaa

liittyvän pääkiertovirtausten käyttäytymiseen. Pääkiertopiireissä 2 ja 4 virtaukset eivät enää seuraa täysin toisiaan ja ennen kuin vuotovirtaus romahtaa, kasvaa pääkiertopiirin 3 virtaus reaktoriin päin kuuman haaran puolella merkittävästi aiheuttaen paineistimen pinnan laskun, jolloin vuotovirtaus muuttuu kokonaan höyryksi. Laskentatuloksista ei käy ilmi, minkä takia virtaus käyttäytyy pääkiertopiireissä tällä tavalla.

Koetuloksissa värähtely vaikuttaa olevan yhteydessä hätäjähdytysyöttöön. Ajallisesti tämä ei tapahdu täysin samaan aikaan, sillä hätäjähdytysvesi täyttää ensin primääripiiriä aiheuttaen paineistimen pinnan nousua, kuten kuvasta 6.13 voi huomata. Kuvassa on esitetty paineistimen pinnankorkeus Aproksen laskemana ja koetuloksissa.

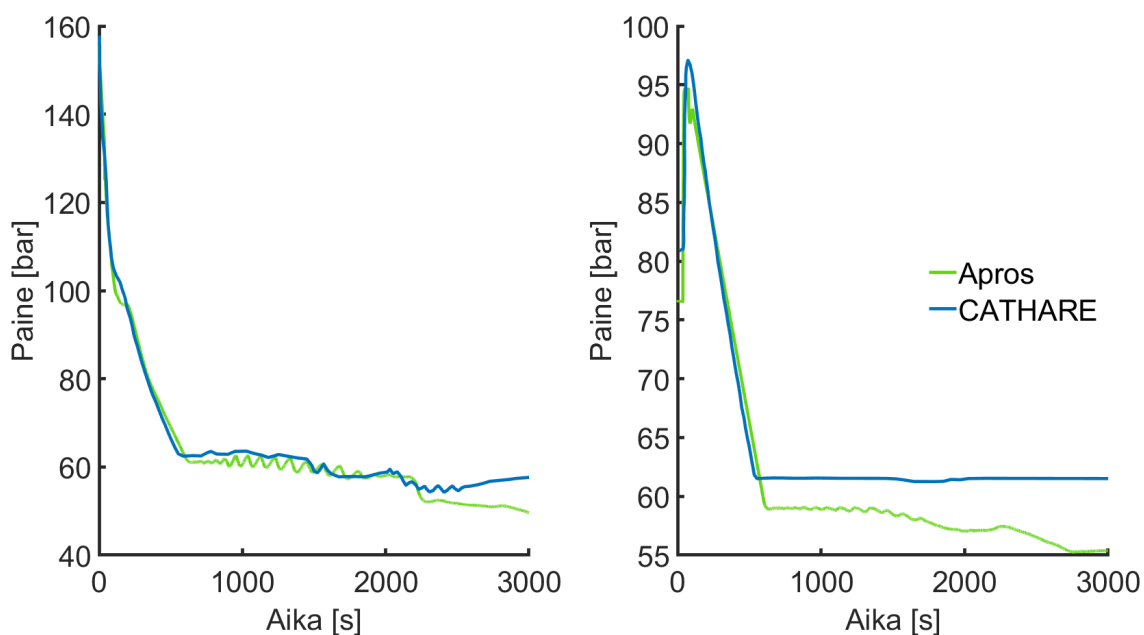


Kuva 6.13. Paineistimen pinnankorkeus Aproksella laskettuna ja koetuloksissa. Koetuloksissa pinnankorkeus on määrätty alkuperäisen paineistimen korkeuden mukaan [59]. Katkoviivalla on merkitty osittaisen jäähdytyksen päättymisen ajankohta Aproksessa ja koetuloksissa. Koetulokset lähteestä [59].

Apros-tuloksissa paineistimen pinta ei laske samalla tavalla ensimmäisen piikin jälkeen. Tämä voi johtua siitä, että Aproksessa hätäjähdytysyöttö alkaa huomattavasti aikaisemmin paineen nopeamman laskun takia. Alkuun pinnankorkeus käyttäytyy kuitenkin hyvin samalla tavalla ja paineistimen lämmittimet sammuvat lähes samaan aikaan. Molemmissa tuloksissa esiintyy värähtelyä, mutta siinä missä koetuloksissa värähtely vaikuttaa olevan riippuvainen hätäjähdytysyötöstä, Aproksessa paineistimen pinnan värähtely selittyy vuotovirtauksen värähtelyllä, johon ei hätäjähdytysyöttö vaikuta. Hätäjähdytysyötösäkin esiintyy pientä värähtelyä, mutta värähtely tässä seuraa primääripiirin painetta, joka taas värähtelee hiukan vuotovirtauksen vuoksi.

Koetuloksista ja Apros-tuloksista voidaan huomata samoja ilmiöitä ja niiden seurauksia, vaikka erojakin löytyy. Suurin osa eroista on kuitenkin mahdollista selittää koejärjestelyllä tai itse koelaitteiston ominaisuuksilla. Apros-tulokset ovat lähempänä laitostoimittajan

analyysin tuloksia alkutilan eroista huolimatta. Kuvassa 6.14 on esitetty paineistimen ja sekundääripiirin paine. Paine käyttäytyy molemmissa analyyseissä hyvin samalla tavalla, joten taulukossa 6.2 esiintyvät erot pikasulun alkamisessa liittyvät painerajojen eroihin.

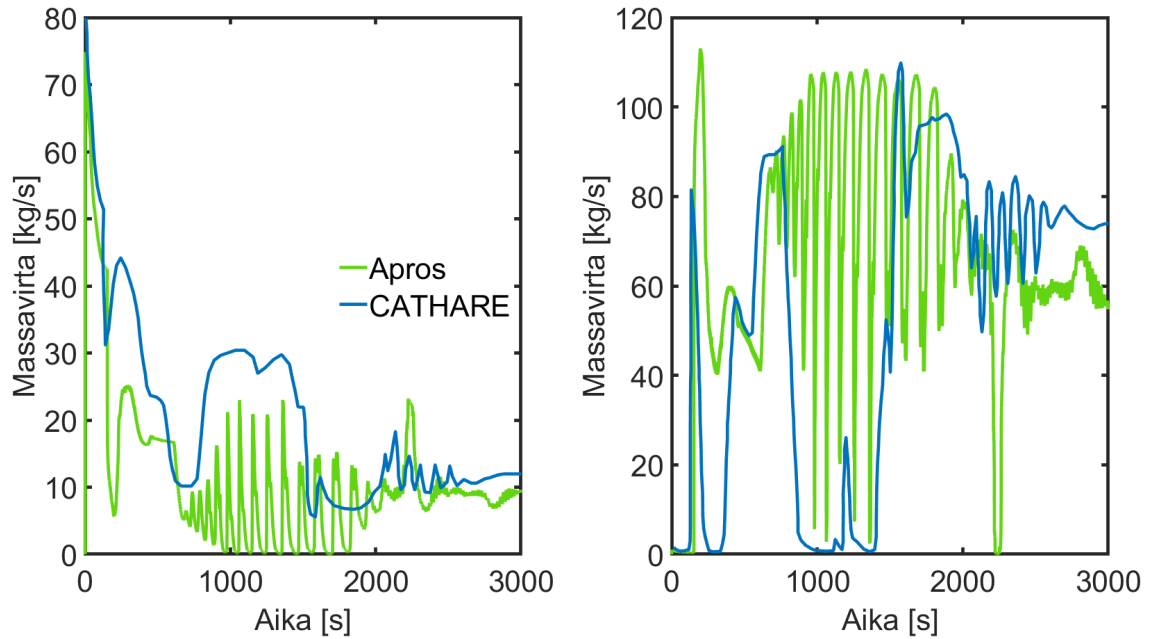


Kuva 6.14. Paineistimen ja sekundääripiirin paine, laitostoimittajan tulokset lähteestä [22, s. 19, 21].

Sekundääripiirin paine on alhaisempi alkutilassa ja osittaisen jäähdytyksen asetusarvot ovat alhaisemmat Aproksessa, mutta ajallisesti paine käyttäytyy hyvin samalla tavalla molemmissa tuloksissa. Laitostoimittajan analyysissä sekundääripiirin paine pysyy vakiona osittaisen jäähdytyksen loputtua, mutta Aproksessa paine jatkaa laskua. CATHAREN syötetiedostojen perusteella turbiinilaitoksen järjestelmiä tai toimintoja ei ole mallinnettu CATHAREssa, mutta Aproksessa sekundääripiiri on kuvattu varsin hyvin, mikä voi vaikuttaa sekundääripaineen käyttäytymiseen. Lisäksi primääripiirin paineen värähtely, joka johtuu vuotovirtauksen värähtelystä, näyttäisi vaikuttavan myös sekundääripiirin paineeseen aiheuttaen pientä värähtelyä.

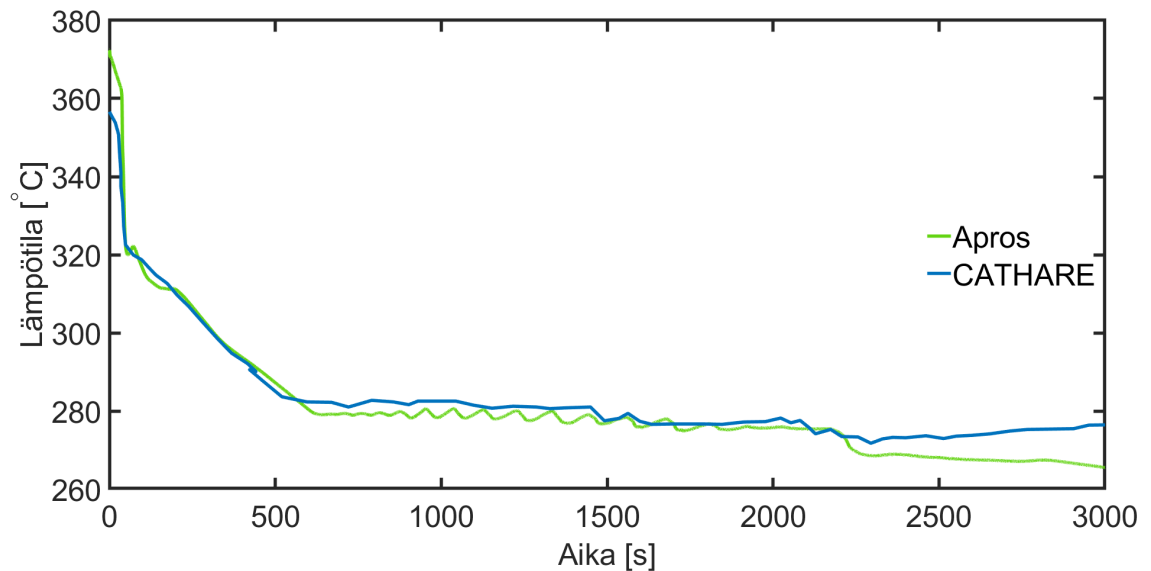
Vuotovirtaus on laitostoimittajan tuloksissa kuvattu erikseen höyryn ja veden osalta. Kuvassa 6.15 on esitetty vuotovirtauksen massavirta höyrylle ja vedelle erikseen sekä Aproksessa että laitostoimittajan analyysituloksissa. Vaikka samanlaista värähtelyä ei olekaan havaittavissa kuin Aproksessa, on samoja ilmiöitä mahdollista huomata kuvissa. Vuotovirtauksen suuruus kokonaisuudessaan on samaa luokkaa ja molemmissa tapauksissa höyryvirran kasvaessa veden virtaus pienenee. CATHARE-tuloksissa on huomattavissa myös jonkin verran värähtelyä, mutta huomattavasti vähemmän verrattuna Aproksituloksiin.

Suojakuoren maksimilämpötila on esitetty kuvassa 6.16. Aproks-tulokset vastaavat hyvin laitostoimittajan tuloksia, mihin todennäköisesti vaikuttaa se, että polttoaine ei joudu tässä



Kuva 6.15. Höyry- ja vesivuotovirtaus, laitostoimittajan tulokset lähteestä [22, s. 23].

tapauksessa lämmönsiirtokriisiin ollenkaan. Aproksen tapauksessa suojakuoren lämpötila on alkutilassa korkeampi, sillä Aproksessa on mallinnettu myös kuuma sauva. Laitostoimittajan analyysissä on laskettu tapaus vain keskiarvosydämellä, sillä toisella laskentakoodilla on osoitettu, ettei polttoaine joudu lämmönsiirtokriisiin [22, s. 3–4, 9].



Kuva 6.16. Suojakuoren maksimilämpötila kuumassa sauvassa, laitostoimittajan tulokset lähteestä [22, s. 18].

Apros-tuloksissa hätäjähdytysveden lämpötila on selkeästi alhaisempi kuin laitostoimittajan analyysissä, mikä voisi vaikuttaa suojakuoren maksimilämpötilaan. Hätäjähdytysvirtaus on kuitenkin pientä verrattuna primääripiirin vesimassaan ja molemmissa analyysissä hätäjähdytysveden lämpötila on selkeästi jäädytteen keskilämpötilaa alhaisem-

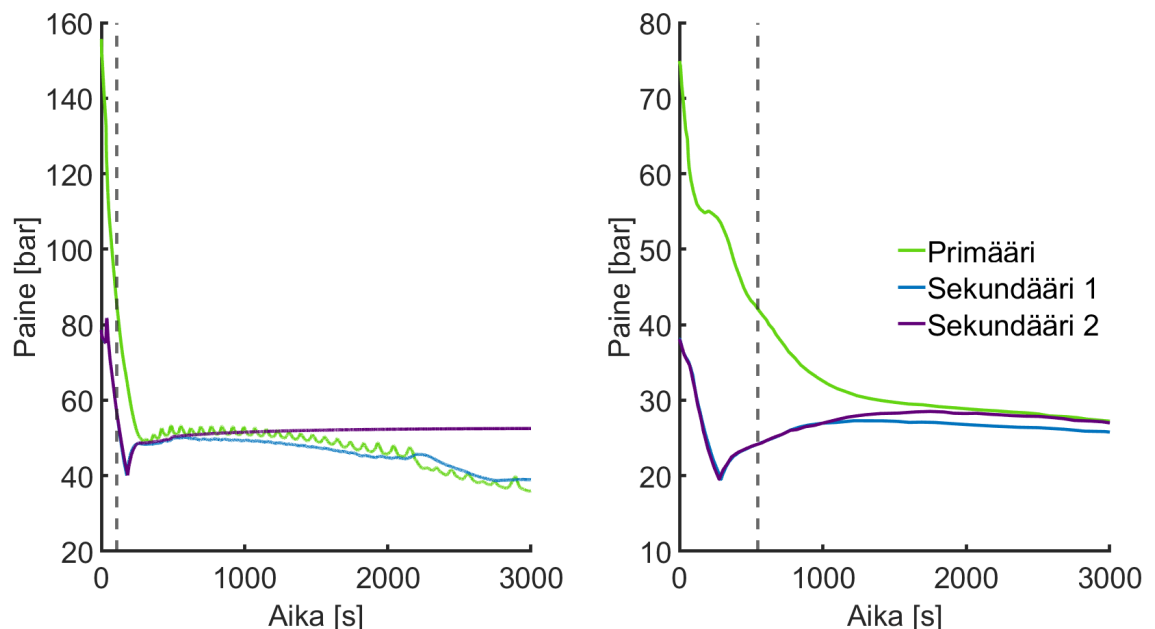
pi, joten tällä ei ole vaikutusta polttoaineen joutumisessa lämmönsiirtokriisiin eikä siten merkittävää vaikutusta lämpötilatuloksiin.

PSV:n ja MSRT:n yhtäaikaista avautumista vertaillaan kokeellisiin tuloksiin. Taulukossa 6.3 on koottu tapahtumasarja sekä koetuloksissa että Aproksella laskettuna. Erot näiden välillä ovat hyvin samanlaisia kuin PSV:n avautumisessa, joten tässä keskitytään eroihin, joita ei löydy edeltävästä tapauksesta.

Taulukko 6.3. Tapahtumasarja kolmannessa laskentatapauksessa (PSV + MSRT) alkaen alkutapahtumasta, vertailu koetuloksiin [59].

Tapahtuma	Koe	Apros
Reaktorin pikasulku	50 s	29,9 s
LOOP alkaa	78 s	38,5 s
Paineistimen lämmitin pois	152 s	340,6 s
MSRT sulkeutuu	276/289 s	178,4/184,6 s
MHSI-syöttö alkaa	545 s	108,6 s

Reaktorin pikasulku tapahtuu aiemmin kuin PSV:n avautumisessa molemmissa tapauksissa, sillä paine laskee kummassakin tapauksessa nopeammin sekundääripiiriin nopean paineenlaskun vuoksi. Kuvassa 6.17 on primääri- ja sekundääripiirien paineet Aproksen laskemana ja koetuloksissa samalla tavalla, kuin kuvassa 6.11.



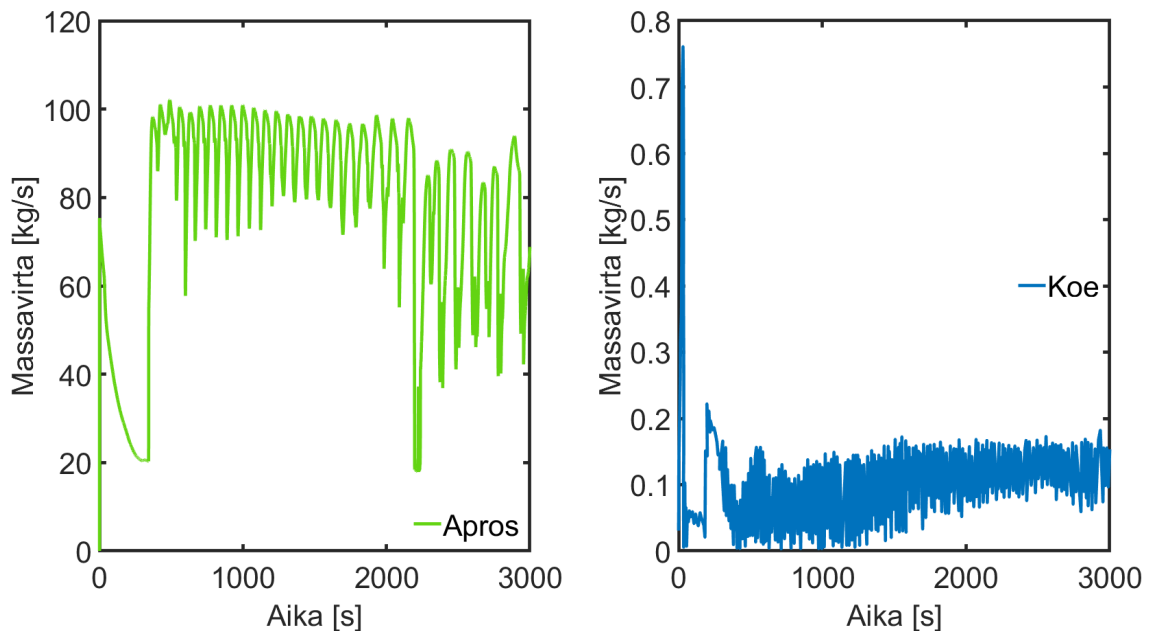
Kuva 6.17. Primääri- ja sekundääripaine Aproksella laskettuna ja koetuloksissa. Koetuloksissa paineet on skaalattu koelaitteiston mukaisesti [59]. Katkoviivalla on merkitty MHSI-syötön alkamisen ajankohta Aproksessa ja koetuloksissa. Koetulokset lähteestä [59].

Aproksessa primääripiirin paine laskee huomattavasti nopeammin, minkä takia myös ul-

koisen verkon menetys ja MHSI-syöttö alkavat huomattavasti aiemmin. Koejärjestelyn ja koelaitteiston erojen lisäksi sekundääripiirin paineen nopeampi lasku voi vaikuttaa tähän. Aproksessa sekundääripiirin paine alkuun nousee hiukan, joka johtuu turbiinin pikasulusta. Tämän jälkeen paine laskee nopeammin kuin koetuloksissa, mikä voi johtua MSRT-venttiilien virtauksen mitoituksesta tai eroista hätäsyöttöveden tai kokeen tapauksessa lisäveden syötössä.

Tässä tapauksessa sekundääripuolella tapahtuu selkeä ero höyrystimien välillä riippuen hätäsyöttöveden pumppauksesta. Hätäsyöttövesipumput paineistavat vuotavat höyrystimet kiertopiireissä 1 ja 4, mutta muissa paine jatkaa laskua seuraten primääripiirin painetta. Tämä johtuu siitä, että sekundääripaineen laskeessa alle 40 baarin rajan, suojaus toiminto eristää höyrylinjat, jolloin paine ei pääse tasaantumaan eri höyrystimien välillä. Koetuloksissa erot eri piirien välillä johtuvat todennäköisesti samoista syistä kuin pelkän PSV:n avautumisen tapauksessa eli primääripiirin paineen ja virtauksien epäsymmetrisyydestä pääkiertopiireissä.

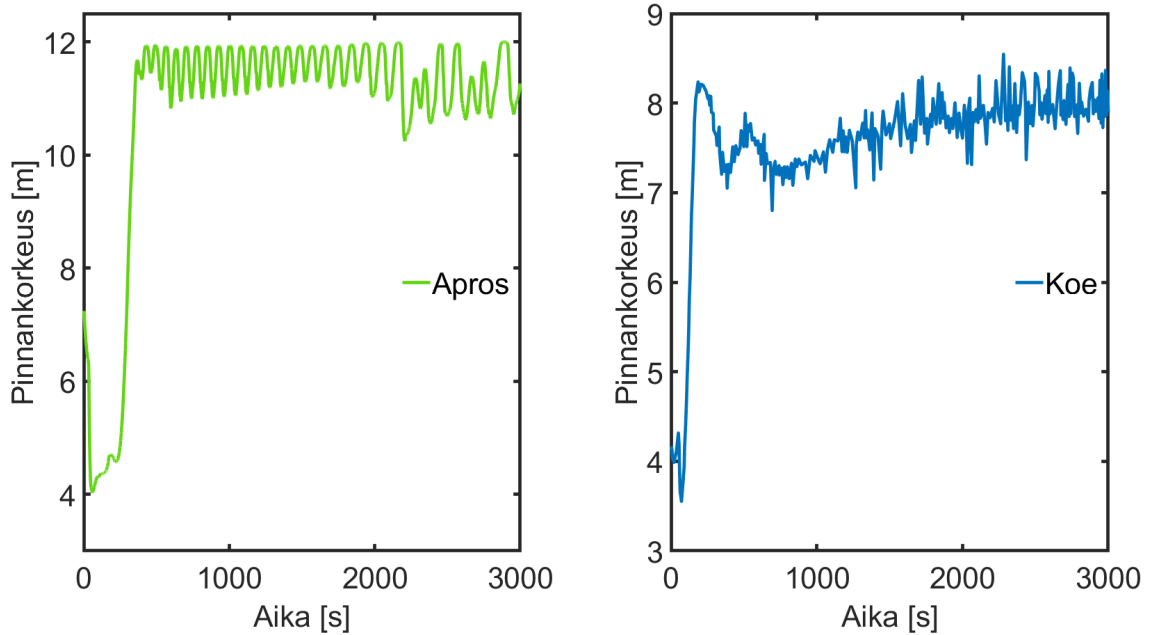
Kokonaisvuotovirtaus PSV:n kautta on esitetty kuvassa 6.18. Tässäkin koetuloksissa ensimmäinen piikki on huomattavasti keskimääräistä vuotovirtausta korkeampi, minkä takia kuvissa on huomattavasti eroa. Aproksen tapauksessa kokonaisvirtaus laskee pidempään, ennen kuin pinnankorkeus nousee paineistimessa riittävästi, jolloin vuotovirtauksen värähtely alkaa samoin kuin PSV:n avautumisessa.



Kuva 6.18. Kokonaisvuotovirtaus Aproksen laskemana ja koetuloksissa. Koetuloksissa vuotovirtauksen poikkipinta-ala on skaalattu koelaitteiston mukaisesti [59]. Koetulokset lähteestä [59].

Paineistimen pinnankorkeus on esitetty kuvassa 6.19. Toisin kuin koetuloksissa, Aproksessa pinta laskee pidemmän aikaa, kunnes lopulta alkaa nousemaan. Tämä todennäköi-

sesti johtuu siitä, että paine piirissä laskee huomattavasti nopeammin, jolloin pinnannousu paineistimessa on hitaampaa. Tämä aiheuttaa myös sen, että paineistimen lämmittimet sammuvat huomattavasti myöhemmin Aproksessa verrattuna koetuloksiin.



Kuva 6.19. Paineistimen pinnankorkeus Aproksen laskemana ja koetuloksissa. Koetuloksissa pinnankorkeus on määrätty alkuperäisen paineistimen korkeuden mukaan [59]. Koetulokset lähteestä [59].

Vuotovirtaus ei värähtele alkuun ihan yhtä paljon kuin pelkän PSV:n avautumisen Aproksituloksissa. Tämä todennäköisesti vaikuttaa siihen, että pinta paineistimessa vaikuttaa olevan korkeampi kuvassa 6.19 verrattuna kuvaan 6.13. Lisäksi vuotovirtauksessa on huomattavissa samanlainen romahdus noin 2200 sekuntia alun jälkeen, joka vaikuttaa johtuvan samoista ilmiöistä kuin PSV:n avautumisessa.

Primääripiirin paine laskisi tässä tapauksessa alle paineakkujen paineen, joten todellisuudessa ne alkaisivat syöttämään vettä myös primääripiiriin. Laskennassa pyrittiin kuitenkin toistamaan koe mahdollisimman samalla tavalla, joten akkusyöttö estettiin. Tässäkin tapauksessa on paljon eroja koetulosten ja Aproksen laskennan välillä, jotka kuitenkin pystytään pitkälti selittämään koelaitteiston sekä koejärjestelyn eroilla.

6.4 Johtopäätökset ja kehitysehdotukset

Ensimmäisen laskentatapauksen perusteella voidaan sanoa, että 2A-LOCA on erittäin herkkä alkutilalle monikanavamallilla mallinnettaessa. Tämän tapauksen laskeminen turvallisuusanalyysjä varten saattaa siis vaatia useamman laskennan toiston, jotta tulos on riittävällä varmuudella konservatiivinen. Massavirtojen tarkastelu tässä osoittaa kuitenkin sen, että reaktorin virtausolosuhteita tarkkailemalla voidaan saada osviittaa siitä, onko suoja-kuoren lämpötilaksi saatu konservatiivinen arvo vai olisiko mahdollista saa-

da huomattavasti korkeampi arvo toistamalla laskenta hieman eri alkutilasta. Tällä tavoin voidaan mahdollisesti vähentää laskennan toistokertoja.

Vaikka joidenkin alustuksien aikaista prosessisuureiden muuttumista työssä käytetyllä AproS-versiolla ei pystytäkään estämään, voi siihen tarkoitettu toiminto mahdollistaa joidenkin pienten muutosten vaikutusten tarkastelun laskentatapauksissa. Eri malliversioiden vertailuun tästä ei ole kuitenkaan juuri hyötyä. Tässä työssä tarkasteltiin myös malliversiota, johon oli mallinnettu polttoaine-elementtien ohjausputket, mutta tämän tarkastelun perusteella malliversioiden eroja ei pystytä toteamaan. Jotta mallien väliset erot saataisiin selkeästi esiin, tulisi kummallakin versiolla toistaa laskentatapaus useampaan kertaan. Tällainen tarkastelu malliversioille kannattaa tehdä, jotta jatkossa voidaan käyttää analyyseihin paremmin soveltuvaa versiota. Molemmat mallit ennustavat virtauksien ja paineen käyttäytymistä lähes samalla tavalla, joten turvallisuusanalyyseissä olisi perusteltua käyttää malliversiota, joka antaa korkeampia arvoja suojakuoren maksimilämpötilalle.

Toisessa laskentatapauksessa AproS laski paineiden ja virtauksien käyttäytymistä hyvin samalla tavalla kuin laitostoimittajan analyysissä. Tämän perusteella monikanavamalli mallintaa hyvin suurten vuotojen ilmiöitä. Selkeästi poikkeavaksi tulokseksi jäi suojakuoren maksimilämpötila. Lämmönsiirtokriisi tulee huomattavasti hitaammin paineistimen yhdyslinjan katkossa kuin 2A-LOCAssa, jolloin kriittisen lämpövuon korrelaation ja kiehunnan vaiheen määrityksen merkitys kasvaa huomattavasti. Monikanavamalliin olisi hyvä lisätä laitostoimittajan analyyseissä käytetty korrelaatio kriittiselle lämpövuolle ja käydä läpi, onko kiehunnan vaiheen määrityksessä suuria eroja Aproksen ja laitostoimittajan analyysin välillä. Näillä muutoksilla toista laskentatapausta voisi tarkastella uudestaan huomioiden kuitenkin ensimmäisen tapauksen perusteella tehdyt huomiot. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että tapaus pitäisi toistaa useampaan kertaan. Sama pätee myös eri vika- ja ennakkohuoltoyhdistelmien tarkastelulle.

Kolmannessa laskentatapauksessa paineistimen varoventtiilin avautuminen vastasi suhteellisen hyvin laitostoimittajan analyysiä, mikä viittaa siihen, että monikanavamalli pystyy mallintamaan pienemmänkin vuodon ilmiöitä. Tässä laskentatapauksessa oli huomattavasti enemmän eroja kokeellisiin tuloksiin, mutta erot olivat selitettävissä suurelta osin koelaitteiston tai itse koejärjestelyn eroilla verrattuna laitokseen ja sen toimintaan. Virtauksien jaksoittainen heilahtelu, mikä näkyi myös paineissa, pinnankorkeuksissa ja vuotovirtauksessa, vaatii lisää tarkastelua, sillä tämän työn perusteella ei voida sanoa, onko kyse fyysikaalisesta ilmiöstä vai mallin noodirakenteen aiheuttamasta ominaisuudesta. Tästä huolimatta vertailu laitostoimittajan analyysiin osoitti, että tässäkin tapauksessa malli ennustaa hyvin paineen käyttäytymistä. Suojakuoren maksimilämpötilan käyttäytyminen oli myös hyvin samanlaista AproS-tuloksissa ja laitostoimittajan analyysissä, sillä kummassakaan tapauksessa polttoaine ei joutunut lämmönsiirtokriisiin.

Kaikissa laskentatapauksissa onnettomuusluokkien hyväksymiskriteerit täytetään hyvillä marginaaleilla, joten tältä kannalta erot esimerkiksi suojakuoren maksimilämpötiloissa eivät ole merkittäviä. Suojakuoren maksimilämpötila on ainoa arvo, mitä hyväksymiskriteereistä tarkasteltiin, sillä testisimulointien perusteella esimerkiksi suojakuoren oksidikerros jäi hyvin pieneksi ja selkeästi alle hyväksymisrajan. Vaurioituneiden sauvojen määrää ei monikanavamallilla voi tarkastella, joten suojakuoren maksimilämpötila jäi ainoaksi tarkasteltavaksi suureeksi. Kolmatta laskentatapausta tullaan jatkossa tarkastelemaan 3D-mallilla, joka mahdollistaa DNBR:n ja sen mahdollisesti aiheuttaman pikasulun tarkemman analysoinnin. Kaikkien tapauksien loppupuolella hätäjähdytysyöttö kasvaa suunnilleen yhtä suureksi tai suuremmaksi kuin vuotovirtaus. Tämä viittaa siihen, että reaktori saadaan ensin hallittuun ja sitten turvalliseen tilaan operaattoreiden toimenpiteillä.

Monikanavamallia kehitettiin paljon tämän työn aikana ja kehittämistä riittää edelleen. Ensimmäinen malliversio, millä testisimulointeja tehtiin, oli viritetty hyvin pitkälti 2A-LOCAn tarpeisiin. Kaikkia muutoksia ei kuitenkaan löytynyt dokumentaatiosta, joten muokkauksia muiden laskentatapauksien tarpeisiin piti tehdä jatkuvasti sitä mukaa kun testisimuloinneissa ilmeni ongelmia. Mallista korjattiin myös joitakin 2A-LOCAn liittyviä virheitä, kuten hätäyöttövesijärjestelmän virhe ylivirtaussuojauksen mallinnuksessa ja alasmeno-tilan CCFL-korrelaation geometrinen pituus. Tässä työssä käytettyihin malliversioihin kuitenkin jäi joitakin korjattavia asioita, kuten paineistimen alhainen pinnankorkeus ja osittaisen jäähdytyksen toimimattomuus. Näiden muokkaaminen eri laskentatapauksiin aiheutti ylimääräistä työtä, minkä takia niiden korjaaminen tulevaisuudessa päivitettävään malliversioon olisi järkevää.

Ensimmäisen ja toisen laskentatapauksen simulointi oli hidasta, sillä suurien vuotojen tapauksessa ilmiöt ovat äärimmäisiä, joten simuloinnit on tehtävä pienellä aika-askeleella. Ensimmäisen tapauksen laskemiseen meni noin neljä vuorokautta ja toisen kolme vuorokautta. Lisäksi molemmat tapaukset vaativat vielä jatkossakin mahdollisesti useamman toistokerran, mikä hidastaa analyysin tekemistä entisestään. Kolmas laskentatapaus saatiin simuloitua vuorokaudessa, mutta tässäkin täytyi varmistua siitä, että aika-askeleen kasvattaminen ei vaikuttanut tuloksiin.

Vaikka työssä käytetyissä malliversioissa onkin vielä joitakin puutteita ja se ei sovellu LOCAn mallinnukseen ehdoitta, malli on kuitenkin toimiva työkalu tällaisissa laskentatapauksissa. Monikanavamallin tuloksissa on nähtävissä selkeästi onnettomuuksien vaiheet ja ilmiöt. Malli simuloi hyvin erityisesti paineen ja virtauksien käyttäytymistä suurissa LOCA-tilanteissa, mitkä ovat yleensä rajoittavia tapauksia turvallisuusanalyysien näkökulmasta. 1D-mallilla virtauksen käyttäytymistä reaktorissa olisi mahdoton kuvata ja 3D-malli on LOCAn tarkasteluun liian raskas, joten monikanavamalli on paras vaihtoehto LOCA-analyysiin.

7 YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli perehtyä jäähdytteenmenetysonnettomuuteen ja tarkastella eri onnettomuustapauksien avulla monikanavamallin soveltuvuutta kyseisen onnettomuustyyppin analysointiin. Painevesireaktoreiden jäähdytteenmenetysonnettomuudessa primääripiirin jäähdytettä vuotaa suojarakennukseen putkirikon tai venttiilin virheellisen avautumisen seurauksena. Jäähdytevuoto voi vaarantaa reaktorin jäähdytyksen, minkä takia onnettomuustyyppin eri ilmiöiden ymmärtäminen ja niihin varautuminen on tärkeää ydinturvallisuussuunnittelun kannalta.

Työn kirjallisuusosuudessa perehdyttiin erityisesti Three Mile Islandin laitossykliä tapahtuneeseen jäähdytteenmenetysonnettomuuteen. Lisäksi työssä käytiin läpi viranomaisvaatimuksia turvallisuusanalyysille ja -järjestelmille. Turvallisuusjärjestelmiä tarkasteltiin erityisesti painevesireaktoreiden näkökulmasta. Jäähdytteenmenetysonnettomuuden vaiheita ja ilmiöitä tarkasteltiin termohydrauliikan ja lämmönsiirron osalta. Lopuksi kirjallisuusosuudessa perehdyttiin onnettomuuksien mallintamiseen systeemikoodeilla. Tässä tarkasteltiin erityisesti systeemikoodia Apros ja Olkiluoto 3 -laitossyklin monikanavamallia. Työssä nostettiin myös esiin muutamia tärkeimpien ilmiöiden mallintamiseen liittyviä empiirisiä korrelaatioita, sillä ne ovat tärkeitä termohydrauliikan mallinnuksessa.

Monikanavamalli on rakennettu erityisesti jäähdytteenmenetysonnettomuuden mallintamista varten. Siinä reaktorin polttoaine-elementit on ryhmitelty laskentakanaviin, jotka mallintavat keskiarvoista polttoainesauvaa. Työhön valittiin kolme eri laskentatapausta: primääriputkilinjan kaksipäinen giljotiniakatko eli 2A-LOCA, paineistimen yhdyslinjan katko sekä paineistimen varoventtiilin ja sekundääripiirin höyrylinjojen ulospuhallusventtiilien yhtäaikainen avautuminen. Ensimmäisen tapauksen avulla tarkasteltiin laskennan herkkyyttä pienille eroille monikanavamallin alkutilassa. Toinen laskentatapausta pyrittiin toistamaan mahdollisimman samalla tavalla laitostoimittajan analyysin kanssa ja kolmatta laskentatapausta vertailtiin kokeellisiin tuloksiin.

Ensimmäinen laskentatapausta on suurin mahdollinen vuototilanne, joten siinä ilmiöt ovat myös selkeimpiä. Tapausta toistamalla huomattiin, että simulointitulokset ovat erittäin herkkiä alkutilan pienille muutoksille, jotka aiheutuivat laskennan alustuksesta. Suojakuoren maksimilämpötila vaihteli kymmeniä asteita eri toistojen välillä ja vaihtelua oli myös maksimilämpötilan ajankohdassa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että turvallisuusa-

nalyyseissä tämän tyyppisiä onnettomuustapauksia täytyy laskea useamman kerran, jotta suojakuoren lämpötila on riittävällä varmuudella konservatiivinen. Tarkastelemalla virtausolosuhteita laskentakanavien yläpuolella voidaan kuitenkin vähentää toistokertoja, sillä virtauksien ja suojakuoren maksimilämpötilan välillä oli havaittavissa yhteys.

Toisen laskentatapauksen tulokset vastasivat ilmiöiden suhteen erittäin hyvin laitostoimittajan analyysiä. Paineet ja massavirrat käyttäytyivät hyvin samalla tavalla, mikä osoitti mallin toimivuuden. Suojakuoren maksimilämpötila jäi huomattavasti alhaisemmaksi verrattuna laitostoimittajan analyysiin. Todennäköisin selitys tähän on erilainen kriittisen lämpövuon korrelaatio Aproksessa, joten tulevaisuudessa monikanavamalliin tulisi mallintaa myös laitostoimittajan käyttämä korrelaatio. Tästä syystä ei ollut mahdollista nähdä selkeitä eroja eri vika- ja ennakkohuoltoyhdistelmillä. Kriittisen lämpövuon merkitys korostuu maltillisemmissä vuodoissa, sillä polttoaineen joutuminen lämmönsiirtokriisiin on hitaampaa kuin 2A-LOCAn tapauksessa.

Kolmannessa laskentatapauksessa tarkasteltiin ensin pelkkää paineistimen varoventtiilin avautumista, jota vertailtiin koetulosten lisäksi laitostoimittajan analyysiin. Alkutilan erilaiset oletukset huomioiden tulokset vastasivat suhteellisen hyvin laitostoimittajan analyysiä, joten monikanavamallilla pystytään mallintamaan pienempienkin vuototapausten ilmiöitä. Koetuloksissa oli poikkeavuuksia, mutta erot olivat pääosin selitettävissä koelaitteiston ja kokeen eroilla verrattuna Apro-malliin. Pääkiertopiirien virtauksissa oli havaittavissa hidasta, mutta varsin laajaa värähtelyä, joka näkyy muissakin laskentatuloksissa. Tämän työn perusteella ei voida vetää johtopäätöksiä värähtelyn syystä, joten pieniä vuotoja tulee tutkia lisää tulevaisuudessa.

Tässä työssä käytettiin kahta erilaista versiota monikanavamallista, joista toiseen versioon oli mallinnettu polttoaine-elementtien säätösauvojen ohjausputket. Tämän tarkastelun perusteella ei ole kuitenkaan mahdollista todeta näiden eroja. Tämä vaatisi esimerkiksi ensimmäisen laskentatapauksen toistamista useampia kertoja molemmilla malliversioilla, jotta eroja olisi mahdollista huomata. Monikanavamallia päivitettiin työn aikana ja mallista korjattiin laskennassa havaittuja virheitä ja puutteita. Työn aikana osa korjauskohteista hoidettiin laskentatapauskohtaisilla tilapäisillä muutoksilla, mutta monikanavamallin käytettävyyden ja erityisesti pienten vuotojen laskennan kannalta korjaukset tulisi tehdä myös ylläpidettävään malliversioon. Mallin tärkein käyttökohde on 2A-LOCAn analyysi, jonka laskentavalmius tulee huomioida ensisijaisesti monikanavamallin kehityksessä.

LÄHTEET

- [1] Akimoto, H., Anoda, Y., Takase, K., Yoshida, H. ja Tamai, H. *Nuclear Thermal Hydraulics*. 1. painos. Springer Japan, 2016, 458 p.
- [2] Allen, T. R., Konings, R. J. M. ja Motta, A. T. Corrosion of Zirconium Alloys. Teoksessa: *Comprehensive Nuclear Materials*. Toim. R. J. M. Konings. Vol. 5. Elsevier, 2012, pp. 49–68.
- [3] *Apros help contents, General guides, Apros overview*. VTT Technical Research Centre of Finland ja Fortum Power and Heat Oy, 2019.
- [4] *Apros help contents, Reference manuals, Simulation control and IO, EXPERIMENT _CONTROL*. VTT Technical Research Centre of Finland ja Fortum Power and Heat Oy, 2019.
- [5] Bestion, D. The physical closure laws in the CATHARE code. *Nuclear Engineering and Design* 124 (1990), pp. 229–245.
- [6] Bidois, A. *FSAR OL3 - APPENDIX C2.1.5.5.2.1 - LARGE BREAK 2A-LOCA (STATE A) - PEAK CLAD TEMPERATURE*. Document number: NEPR-F DC 299. Areva NP, 2018, 111 p.
- [7] Braeunig, C. *Olkiluoto 3 Final Safety Analysis Report Chapter 6*. Document number: PEPM-G/2013/en/1026. Areva NP, 2019, 44 p.
- [8] *Computational analysis of the behaviour of nuclear fuel under steady state, transient and accident conditions*. TECDOC Series 1578. International Atomic Energy Agency, 2007, 83 p.
- [9] F. D'Auria, toim. *Thermal Hydraulics in Water-Cooled Nuclear Reactors*. Woodhead Publishing Ltd, 2017, 1178 p.
- [10] Davesne, E. *FSAR OL3 - C2.1.5.5.1 - Intermediate and Large Break LOCA (up to Surge Line Break) (States A, B)*. Document number: NEPR-F DC 293. Areva NP, 2017, 82 p.
- [11] Denis. *PRESSURIZER - UPPER DOME - DETAILS* -. Document number: NFPMR-DB-0222. Areva NP, 2012.
- [12] *Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants, Revision 1*. Specific Safety Guide No. SSG-2(Rev1). International Atomic Energy Agency, 2019, 85 p.
- [13] *Developments in the preparation of operating procedures for emergency conditions of nuclear power plants*. TECDOC Series 341. International Atomic Energy Agency, 1985, 51 p.

- [14] Draperi, L. *Safety Injection System - Residual Heat Removal System In-containment Refueling Water Storage Tank JNA - JND - JNG - JNK System Description*. Document number: NFPMS DC 1012. Areva NP, 2020, 387 p.
- [15] Eurasto, T., Hyvärinen, J., Järvinen, M.-L., Sandberg, J. ja Sjöblom, K.-L. Ydinvoimalaitostekniikan perusteita. Teoksessa: Sandberg, J. *Ydinturvallisuus. Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarja*. Säteilyturvakeskus, 2004, 418 s.
- [16] J. Hämäläinen ja V. Suolanen, toim. *SAFIR2018 - The Finnish Research Programme on Nuclear Power Plant Safety 2015-2018, Final Report*. VTT Technical Research Centre of Finland, 2019, 498 p.
- [17] Hämäläinen, J. ja Suolanen, V. *SAFIR2022 Annual Report 2019*. VTT Technical Research Centre of Finland, 2020, 127 p.
- [18] Haskin, F. E., Camp, A. L., Hodge, S. A. ja Powers, D. A. *Perspectives on reactor safety Revision 2*. NUREG/CR-6042. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2002. Luku 2.1.
- [19] Hesse, A. *Leakage Monitoring System inside Containment and inside Main Steam Valve Rooms System Description*. Document number: EZS-100062. Areva NP, 2018, 54 p.
- [20] Hillberg, S. *ATLAS A5.2 IBLOCA pre-test calculation with Apros*. VTT-R-03700-16. VTT Technical Research Centre of Finland, 2017, 23 p.
- [21] Hillberg, S., Karppinen, I., Silde, A., Hiittenkivi, J., Kurki, J., Leskinen, J., Szogradi, M., Dorval, E., Lauerma, S., Alku, T., Airaksinen, R., Hovi, T. ja Skipnikov, D. Comprehensive and systematic validation of independent safety analysis tools (COVA). Teoksessa: *SAFIR2018 - The Finnish Research Programme on Nuclear Power Plant Safety 2015-2018, Final Report*. Toim. J. Hämäläinen ja V. Suolanen. VTT Technical Research Centre of Finland, 2019, 498 p.
- [22] Howard, J. *FSAR - C2.1.4.5.1 - INADVERTENT OPENING OF A PRESSURIZER PILOT OPERATED SAFETY VALVE (STATE A)*. Document number: NEPR-F DC 365. Areva NP, 2017, 28 p.
- [23] *IAEA/NEA Incident Reporting System (IRS), Reporting guidelines, Feedback from safety related operating experience for nuclear power plants*. International Atomic Energy Agency, 1998, 66 p.
- [24] Inkinen, P. *OECD/ROSA-V Project Test 6-2 Simulation with APROS*. VTT-R-01629-08. VTT Technical Research Centre of Finland, 2008, 18 p.
- [25] *International Experience in the Implementation of Lessons Learned from the Three Mile Island Incident*. TECDOC Series 294. International Atomic Energy Agency, 1983, 271 p.
- [26] Isolanki, A., Järvinen, M.-L., Keskinen, R., Niemelä, I., Ojanen, M., Rantala, R., Sandberg, J., Tiippana, P., Valtonen, K., Virolainen, R. ja Åstrand, K. Ydinturvallisuuden varmistaminen. Teoksessa: Sandberg, J. *Ydinturvallisuus. Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarja*. Säteilyturvakeskus, 2004, 418 s.

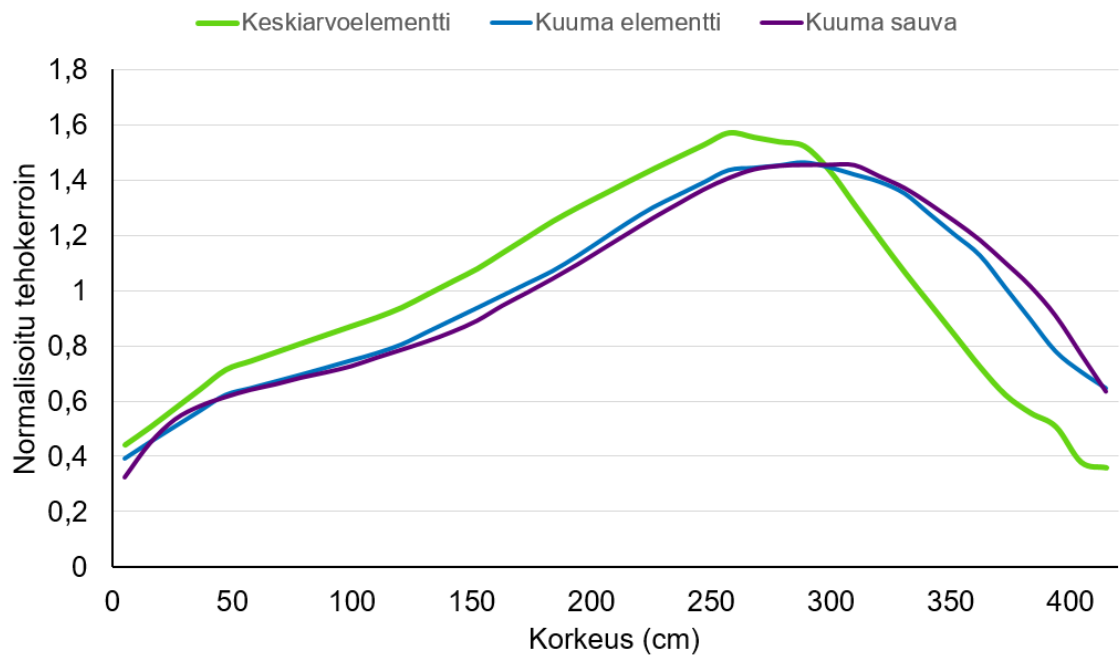
- [27] Jin, Y., Miller, D. J., Qiao, S., Rau, A., Kim, S., Cheung, F.-B., Bajorek, S. M., Tien, K. ja Hoxie, C. L. Uncertainty analysis on droplet size measurement in dispersed flow film boiling regime during reflood using image processing technique. *Nuclear Engineering and Design* 326 (2018), pp. 202–219.
- [28] Juntti, M. ja Kuopanportti, J. *TESTING OF THE OL3 APROS 3D CORE MODEL*. Fortum Power and Heat Oy, 2018, 22 p.
- [29] Kantee, H., Norrman, S., Porkholm, K. ja Kontio, H. CORE INPUT MODEL EFFECT ON PEAK CLADDING TEMPERATURE BEHAVIOR IN LOSS OF COOLANT ACCIDENT ANALYSIS. *Proceedings of ICONE15 15th International Conference on Nuclear Engineering*. Nagoya, Japan, 2007, 6 p.
- [30] Karjunen, T., Suksi, S. ja Tossavainen, K. Kokemukset onnettomuuksista ja poikkeuksellisista tapahtumista ydinlaitoksilla. Teoksessa: Sandberg, J. *Ydinturvallisuus. Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarja*. Säteilyturvakeskus, 2004, 418 s.
- [31] Kattainen, A. ja Kontio, H. *VALIDATION OF APROS OL3 3D MODEL IN LARGE BREAK 2A-LOCA*. Fortum Power and Heat Oy, 2020, 45 p.
- [32] Kauppinen, O.-P., Kouhia, V., Riikonen, V. ja Hyvärinen, J. System code analysis of accumulator nitrogen discharge during LOCA experiment at PWR PACTEL test facility. *Nuclear Engineering and Design* 353 (2019), 13 p.
- [33] *Käyttölupahakemus*. Teollisuuden Voima Oyj. 2016. URL: <https://tem.fi/kayttolupahakemus>. Saatavuus tarkistettu: 3.12.2020.
- [34] Kessler, G. *Sustainable and Safe Nuclear Fission Energy : Technology and Safety of Fast and Thermal Nuclear Reactors*. Springer, 2012, 464 p.
- [35] Kolehmainen, J. *Simulation of the PACTEL non-condensable gas experiments NCG-1, NCG-3, NCG2-04 and NCG2-05 with APROS 5.11.02*. VTT-R-07223-12. VTT Technical Research Centre of Finland, 2012, 33 p.
- [36] Kontio, H. *VALIDATION OF APROS MODELED OL3 LARGE BREAK 2A LOCA*. Fortum Power and Heat Oy, 2019, 103 p.
- [37] Kouhia, V., Riikonen, V., Partanen, H., Räsänen, A., Kauppinen, O.-P., Telkkä, J., Pyy, L. ja Tiainen, K. *General description of the PWR PACTEL test facility – fourth edition*. LUT University, 2019, 28 p.
- [38] Koutaniemi, P., Reponen, H., Salminen, P., Sandberg, J. ja Varjoranta, T. Ydinenergiainsäädäntö ja -hallinto. Teoksessa: Sandberg, J. *Ydinturvallisuus. Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarja*. Säteilyturvakeskus, 2004, 418 s.
- [39] Kurki, J., Ylijoki, J. ja Leskinen, J. *The Constitutive Equations of the Two-Fluid Model*. Apros version 6.09. VTT Technical Research Centre of Finland, 2019, 73 p.
- [40] Lamarsh, J. R. ja Baratta, A. J. *Introduction to Nuclear Engineering*. 3. painos. Prentice Hall, 2001, 783 p.
- [41] *Loss of main and auxiliary feedwater event at the Davis-Besse Plant on June 9, 1985*. Tekninen raportti. NUREG-1154. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1985.

- [42] Martinolli, E. *FSAR OL3 - APPENDIX C3.3.1 DESCRIPTION OF PHYSICAL MODELS AND MODULES OF CATHARE V2.5 CODE USED FOR FSAR OL3 ANALYSES*. Document number: NEPD-F DC 73. Areva NP, 2007.
- [43] Modro, S. M., Aksan, S. N., Berta, V. T. ja Wahba, A. B. *Review of LOFT Large Break Experiments*. NUREG/IA-0028. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1989.
- [44] Mueller, H. *Containment System Description*. Document number: NGPM2/2004/en/1110. Areva NP, 2017, 63 p.
- [45] Niedermeyer, J. *System Description Chemical and Volume Control System 3 OJEW / 3 OKBA / 3 OKBD*. Document number: NGPS8/2005/en/1001. Areva NP, 2019, 163 p.
- [46] *NRC Action Plan Developed as a Result of the TMI-2 Accident, Volume 1*. NUREG-0660. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1980, 400 p.
- [47] *Nuclear Fuel Safety Criteria Technical Review, Second edition*. Nuclear Energy Agency of the OECD, 2012.
- [48] Okabe, K. ja Murao, Y. Hydrodynamics of ECC Water Bypass and Refill of Lower Plenum at PWR-LOCA. *Journal of Nuclear Science and Technology* 24.10 (1987), pp. 785–797.
- [49] Okawa, R. ja Furuya, M. Large-break LOCA analysis with modified boiling heat-transfer model in TRACE code. *Nuclear Engineering and Design* 346 (2019), pp. 97–111.
- [50] Petruzzi, A. ja D'Auria, F. Thermal-Hydraulic System Codes in Nuclear Reactor Safety and Qualification Procedures. *Science and Technology of Nuclear Installations* (2008), 16 p.
- [51] Pettersson, K., Chung, H., Billone, M., Fuketa, T., Nagase, F., Grandjean, C., Hache, G., Papin, J., Heins, L., Hozer, Z., In de Betou, J., Kelppe, S., Mayer, R., Scott, H., Voglewede, J., Sonnenburg, H., Sunder, S., Valach, M., Vrtilkova, V., Waeckel, N., Wiesenack, W. ja Zimmermann, M. *Nuclear Fuel Behaviour in Loss-of-coolant Accident (LOCA) Conditions*. NEA-6846. Nuclear Energy Agency of the OECD, 2009, 369 p.
- [52] Pöllänen, L., Ristonmaa, S., Sandberg, J. ja Vilkkamo, O. Varautuminen häiriöihin ja onnettomuuksiin ydinvoimalaitoksilla. Teoksessa: Sandberg, J. *Ydinturvallisuus. Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarja*. Säteilyturvakeskus, 2004, 418 s.
- [53] Porkholm, K., Kontio, H., Plit, H., Mustonen, M. ja Söderholm, K. APROS Simulation Model for Olkiluoto-3 EPR Applications. *International Topical Meeting on Safety of Nuclear Installations (TOPSAFE)*. Dubrovnik, Kroatia, 2008, 10 p.
- [54] *Proceedings of the International Meeting on Thermal Nuclear Reactor Safety Vol 1*. NUREG/CP-0027. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1983, 753 p.
- [55] *Project Proposal, Experimental Thermal Hydraulics for Analysis and Research and Innovations in Nuclear Safety*. Framatome GmbH, 2019, 25 p.

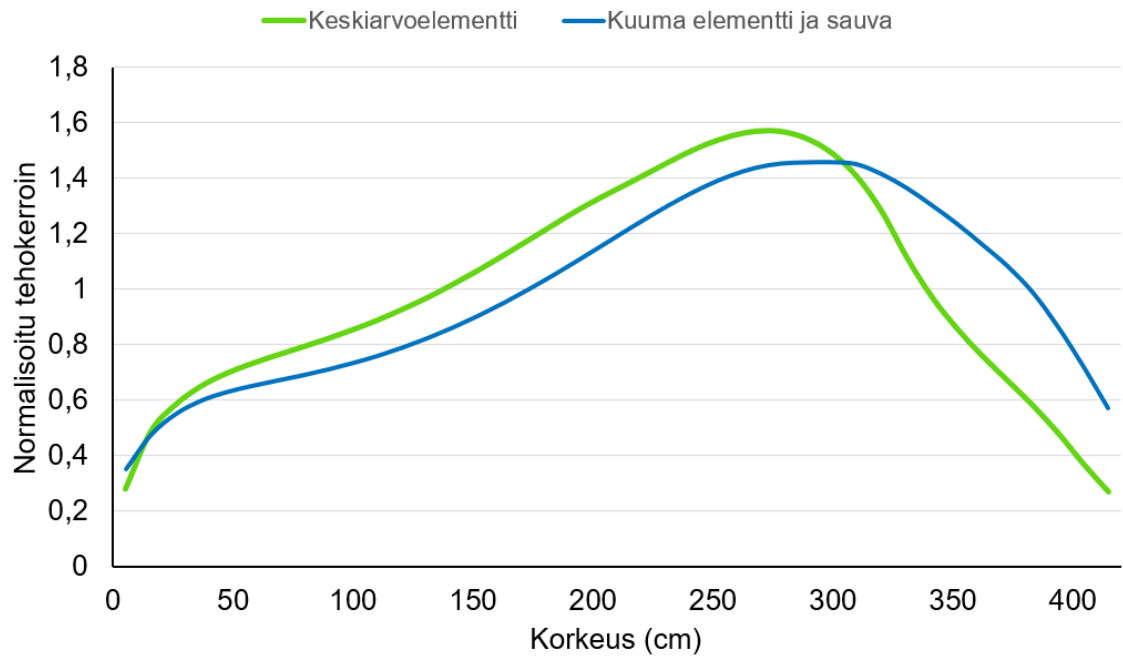
- [56] Puska, E.-K. Nuclear reactor core modelling in multifunctional simulators: Dissertation. Tohtorinväitöskirja. Aalto University, 1999. URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1999/P376.pdf>. Saatavuus tarkistettu: 3.12.2020.
- [57] Raby, J. *FUEL MANAGEMENT CALCULATIONS FOR PLANT DESIGN AND SAFETY ANALYSIS*. Document number: NFPSC DC 1006. Areva NP, 2006, 131 p.
- [58] Riikonen, V., Kauppinen, O.-P., Purhonen, H., Austregesilo, H., Bánáti, J., Cherubini, M., D'Auria, F., Inkinen, P., Karppinen, I., Kral, P., Peltokorpi, L., Peltonen, J. ja Weber, S. Benchmark exercise on SBLOCA experiment of PWR PACTEL facility. *Annals of nuclear energy* 59 (2013), pp. 149–156.
- [59] Riikonen, V. ja Pyy, L. PWR PACTEL experiments of inadvertent opening of SV and MSRT. Julkaisematon (3.12.2020). LUT University. 2020.
- [60] Rudelin, M. *FSAR OL3 - APPENDIX C2.1.1 - PLANT CHARACTERISTICS*. Document number: NFPSR DC 1137. Areva NP, 2017, 59 p.
- [61] Rudelin, M. *FUNCTIONAL REQUIREMENTS ON P/S PROTECTION I&C FUNCTIONS*. Document number: NFPSR DC 1014. Areva NP, 2019, 298 p.
- [62] *SAFETY of Nuclear Power Plants and Design, A Code of Practice*. Safety Series 50-C-D. International Atomic Energy Agency, 1978, 43 p.
- [63] Sandberg, J. *Ydinturvallisuus*. Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarja. Säteilyturvakeskus, 2004, 418 s.
- [64] *Säteilyturvakeskuksen määräys ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta*. STUK Y/1/2018. Säteilyturvakeskus. 2018. URL: <https://www.stuklex.fi/fi/maarays/stuk-y-1-2018>. Saatavuus tarkistettu: 3.12.2020.
- [65] Schollenberger, S. P. ja Cornille, S. *PKL III Tests on Heterogeneous Boron Dilution following SB-LOCA (Cold Leg Break/Cold Leg SI) - Applicability to Reactor Scale*. Areva NP GmbH, 2011, 164 p.
- [66] Technical Summary of the Three Mile Island Unit 2 Accident. Teoksessa: *Analysis of Three Mile Island - Unit 2 Accident*. EPRI-NSAC-80-1. Nuclear Safety Analysis Center, 1980, 527 p.
- [67] Todreas, N. E. ja Kazimi, M. S. *Nuclear Systems I: Thermal Hydraulic Fundamentals*. Taylor & Francis, 1990, 705 p.
- [68] K. Tossavainen, toim. *Suomen ydinvoimalaitosten käyttö, Neljännesvuosiraportti, 1. neljännes 1993*. STUK-B-YTO 108. Säteilyturvakeskus, 1993, 22 s.
- [69] Tuunanen, J., Kouhia, J., Purhonen, H., Riikonen, V., Puustinen, M., Semken, S. R., Partanen, H., Saure, I. ja Pylkkö, H. *General description of the PACTEL test facility*. VTT Technical Research Centre of Finland, 1998, 75 p.
- [70] Umminger, K., Dennhardt, L., Schollenberger, S. ja Schoen, B. Integral Test Facility PKL: Experimental PWR Accident Investigation. *Science and Technology of Nuclear Installations* (2012), 16 p.
- [71] Urhonen, P. *PKL III G7.1 Simulation with Apros*. VTT-R-05070-13. VTT Technical Research Centre of Finland, 2013, 18 p.

- [72] Vermeulen, T. *Reactor Coolant System System Description RCS 30JEC, 30JAA, 30JAC, 30JEA, 30JEF, 30JEG, 30JEB*. Document number: NFPMS DC 1019. Areva NP, 2020, 396 p.
- [73] White, J. D. *Overview PWR-Blowdown Heat Transfer Separate-Effects Program*. Oak Ridge National Laboratory, 1978.
- [74] *Ydinpolttoaine ja reaktori*. YVL B.4. Säteilyturvakeskus. 2019. URL: <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLB-4>. Saatavuus tarkistettu: 3.12.2020.
- [75] *Ydinvoimalaitoksen deterministiset turvallisuusanalyysit*. YVL B.3. Säteilyturvakeskus. 2019. URL: <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLB-3>. Saatavuus tarkistettu: 3.12.2020.
- [76] *Ydinvoimalaitoksen primääripiiri*. YVL B.5. Säteilyturvakeskus. 2019. URL: <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLB-5>. Saatavuus tarkistettu: 3.12.2020.
- [77] *Ydinvoimalaitoksen suojarakennus*. YVL B.6. Säteilyturvakeskus. 2019. URL: <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLB-6>. Saatavuus tarkistettu: 3.12.2020.
- [78] *Ydinvoimalaitoksen todennäköisyysperusteinen riskianalyysi ja riskien hallinta*. YVL A.7. Säteilyturvakeskus. 2019. URL: <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLA-7>. Saatavuus tarkistettu: 3.12.2020.
- [79] *Ydinvoimalaitoksen turvallisuussuunnittelu*. YVL B.1. Säteilyturvakeskus. 2013. URL: https://ohjeisto.stuk.fi/YVLold/YVLB.1fi_2013-11-15.pdf. Saatavuus tarkistettu: 3.12.2020.
- [80] *Ydinvoimalaitoksen turvallisuussuunnittelu*. YVL B.1. Säteilyturvakeskus. 2019. URL: <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLB-1>. Saatavuus tarkistettu: 3.12.2020.

A LASKENTATAPAUKSISSA KÄYTETYT AKSIAALITEHOJAKAUMAT



Kuva A.1. Tapauksen 1 keskiarvoisen elementin aksiaalitehojakauma kanavissa 2–9 sekä kuuman elementin ja kuuman sauvan aksiaalitehojakauma [36, s. 8–10].



Kuva A.2. Tapauksen 2 ja 3 keskiarvoisen elementin aksiaalitehojakauma kanavissa 2–9 sekä kuuman elementin ja kuuman sauvan aksiaalitehojakauma [10, s. 8, 47].

Taulukko A.1. Tapauksen 1 keskiarvoisen elementin aksiaalitehojakauma kanavissa 2–9 [36, s. 10].

Korkeusväli (cm)	Normalisoitu teho	Korkeusväli (cm)	Normalisoitu teho
0 ; 10,5	0,4400	210 ; 220,5	1,3938
10,5 ; 21	0,5041	220,5 ; 231	1,4395
21 ; 31,5	0,5734	231 ; 241,5	1,4830
31,3 ; 42	0,6427	241,5 ; 252	1,5265
42 ; 52,5	0,7120	252 ; 262,5	1,5700
52,5 ; 63	0,7438	262,5 ; 273	1,5538
63 ; 73,5	0,7756	273 ; 283,5	1,5376
73,5 ; 84	0,8074	283,5 ; 294	1,5214
84 ; 94,5	0,8388	294 ; 304,5	1,4332
94,5 ; 105	0,8700	304,5 ; 315	1,3090
105 ; 115,5	0,9012	315 ; 325,5	1,1848
115,5 ; 126	0,9376	325,5 ; 336	1,0638
126 ; 136,5	0,9844	336 ; 346,5	0,9492
136,5 ; 147	1,0312	346,5 ; 357	0,8346
147 ; 157,5	1,0780	357 ; 367,5	0,7200
157,5 ; 168	1,1353	367,5 ; 378	0,6201
168 ; 178,5	1,1926	378 ; 388,5	0,5550
178,5 ; 189	1,2499	388,5 ; 399	0,5051
189 ; 199,5	1,3002	399 ; 409,5	0,3772
199,5 ; 210	1,3470	409,5 ; 420	0,3572

Taulukko A.2. Tapauksen 1 kuumen elementin aksiaalitehojakauma [36, s. 9].

Korkeusväli (cm)	Normalisoitu teho	Korkeusväli (cm)	Normalisoitu teho
0 ; 10,5	0,3929	210 ; 220,5	1,2455
10,5 ; 21	0,4522	220,5 ; 231	1,3005
21 ; 31,5	0,5090	231 ; 241,5	1,3454
31,3 ; 42	0,5659	241,5 ; 252	1,3902
42 ; 52,5	0,6227	252 ; 262,5	1,435
52,5 ; 63	0,6471	262,5 ; 273	1,4435
63 ; 73,5	0,6715	273 ; 283,5	1,4519
73,5 ; 84	0,6959	283,5 ; 294	1,4632
84 ; 94,5	0,7213	294 ; 304,5	1,4457
94,5 ; 105	0,7473	304,5 ; 315	1,4194
105 ; 115,5	0,7733	315 ; 325,5	1,393
115,5 ; 126	0,8052	325,5 ; 336	1,3506
126 ; 136,5	0,8491	336 ; 346,5	1,2759
136,5 ; 147	0,8929	346,5 ; 357	1,2011
147 ; 157,5	0,9368	357 ; 367,5	1,1264
157,5 ; 168	0,9813	367,5 ; 378	1,011
168 ; 178,5	1,0258	378 ; 388,5	0,8956
178,5 ; 189	1,0704	388,5 ; 399	0,7803
189 ; 199,5	1,1253	399 ; 409,5	0,7074
199,5 ; 210	1,1854	409,5 ; 420	0,6471

Taulukko A.3. Tapauksen 1 kuuman sauvan aksiaalitehojakauma [36, s. 8].

Korkeusväli (cm)	Normalisoitu teho	Korkeusväli (cm)	Normalisoitu teho
0 ; 10,5	0,3243	210 ; 220,5	1,2062
10,5 ; 21	0,4475	220,5 ; 231	1,2619
21 ; 31,5	0,5340	231 ; 241,5	1,3135
31,3 ; 42	0,5824	241,5 ; 252	1,3644
42 ; 52,5	0,6146	252 ; 262,5	1,4063
52,5 ; 63	0,6408	262,5 ; 273	1,4375
63 ; 73,5	0,6608	273 ; 283,5	1,4506
73,5 ; 84	0,6845	283,5 ; 294	1,4538
84 ; 94,5	0,7040	294 ; 304,5	1,4547
94,5 ; 105	0,7261	304,5 ; 315	1,4532
105 ; 115,5	0,7565	315 ; 325,5	1,4127
115,5 ; 126	0,7855	325,5 ; 336	1,3703
126 ; 136,5	0,8156	336 ; 346,5	1,3127
136,5 ; 147	0,8497	346,5 ; 357	1,2499
147 ; 157,5	0,8904	357 ; 367,5	1,1819
157,5 ; 168	0,9445	367,5 ; 378	1,1005
168 ; 178,5	0,9924	378 ; 388,5	1,0151
178,5 ; 189	1,0420	388,5 ; 399	0,9087
189 ; 199,5	1,0943	399 ; 409,5	0,7713
199,5 ; 210	1,1504	409,5 ; 420	0,6345

Taulukko A.4. Tapauksen 2 ja 3 keskiarvoisen elementin aksiaalitehojakauma kanavissa 2–9 [10, s. 8, 47].

Korkeusväli (cm)	Normalisoitu teho	Korkeusväli (cm)	Normalisoitu teho
0 ; 10,5	0,2811	210 ; 220,5	1,3836
10,5 ; 21	0,4873	220,5 ; 231	1,4313
21 ; 31,5	0,5855	231 ; 241,5	1,4787
31,3 ; 42	0,6510	241,5 ; 252	1,5200
42 ; 52,5	0,6970	252 ; 262,5	1,5512
52,5 ; 63	0,7321	262,5 ; 273	1,5687
63 ; 73,5	0,7626	273 ; 283,5	1,5681
73,5 ; 84	0,7917	283,5 ; 294	1,5433
84 ; 94,5	0,8215	294 ; 304,5	1,4919
94,5 ; 105	0,8539	304,5 ; 315	1,4072
105 ; 115,5	0,8889	315 ; 325,5	1,2806
115,5 ; 126	0,9286	325,5 ; 336	1,1139
126 ; 136,5	0,9710	336 ; 346,5	0,9714
136,5 ; 147	1,0183	346,5 ; 357	0,8573
147 ; 157,5	1,0685	357 ; 367,5	0,7594
157,5 ; 168	1,1221	367,5 ; 378	0,6707
168 ; 178,5	1,1773	378 ; 388,5	0,5814
178,5 ; 189	1,2331	388,5 ; 399	0,4824
189 ; 199,5	1,2878	399 ; 409,5	0,3718
199,5 ; 210	1,3373	409,5 ; 420	0,2705

Taulukko A.5. Tapauksen 2 ja 3 kuuman elementin ja sauvan aksiaalitehojakauma[10, s. 8, 47].

Korkeusväli (cm)	Normalisoitu teho	Korkeusväli (cm)	Normalisoitu teho
0 ; 10,5	0,3511	210 ; 220,5	1,2177
10,5 ; 21	0,4752	220,5 ; 231	1,2722
21 ; 31,5	0,5508	231 ; 241,5	1,3234
31,3 ; 42	0,5981	241,5 ; 252	1,3693
42 ; 52,5	0,6285	252 ; 262,5	1,4076
52,5 ; 63	0,6506	262,5 ; 273	1,4358
63 ; 73,5	0,6698	273 ; 283,5	1,4512
73,5 ; 84	0,6886	283,5 ; 294	1,4553
84 ; 94,5	0,7093	294 ; 304,5	1,4563
94,5 ; 105	0,7329	304,5 ; 315	1,4490
105 ; 115,5	0,7590	315 ; 325,5	1,4137
115,5 ; 126	0,7896	325,5 ; 336	1,3635
126 ; 136,5	0,8235	336 ; 346,5	1,3011
136,5 ; 147	0,8616	346,5 ; 357	1,2345
147 ; 157,5	0,9037	357 ; 367,5	1,1601
157,5 ; 168	0,9495	367,5 ; 378	1,0827
168 ; 178,5	0,9989	378 ; 388,5	0,9884
178,5 ; 189	1,0510	388,5 ; 399	0,8652
189 ; 199,5	1,1056	399 ; 409,5	0,7239
199,5 ; 210	1,1615	409,5 ; 420	0,5706

B LASKENTATAPAUSTEN ALKUTILOIHIN TEHDYT MUUTOKSET

//muutokset tapauksen 1 alkutilaan

//LHSI-järjestelmän lämmönvaihdin samaan lämpötilaan

//kuin syötettävän veden lämpötila

amodi "JN40_PO01" "PO11_TEMPERATURE" "42"

amodi "JN40_PO02" "PO11_TEMPERATURE" "42"

//MHSI lämpötila muokattu käsin

//pikasulun käynnistyminen halutusta signaalista

aexclude "RT_08_AND01"

aexclude "RT_17_NM01"

//osittainen jäädytys pois

aexclude "MSRCV_1_OR04"

//alkutilan simuloinnin ajaksi lisätty simulointiin kemikaalien-

//ja tilavuudenjärjestelmä (KBA part 1 ja part 2)

//alkutilan simuloinnin ajaksi poistetut suojaustoiminnot

//palautetaan, kun tasapainotila saavutettu

aexclude "MD6311_OR03"

aexclude "MD6312_OR01"

aexclude "MD632_AND07"

aexclude "MD6471_SR02"

aexclude "MD6472_AND02"

aexclude "SP848_LVC01"

aexclude "SP848_LVC02"

aexclude "SP848_LVC03"

```
//kemikaalien- ja tilavuudenjärjestelmän sulkeminen tehty käsin
```

```
//reaktorin pikasulun muokkaaminen tehty käsin
```

```
//turbiinin pikasulun viive oikein
```

```
amodi "TUTR_BDL01" "DELAY_UP" "2.4"
```

```
//EFWS käynnistyminen LOOPista ja hätäjähdytys-signaalista
```

```
amodi "LAR11AA105_R01" "DC2_OUTPUT_VALUE" "1"
```

```
amodi "LAR41AA105_R01" "DC2_OUTPUT_VALUE" "1"
```

```
//vikaoletukset, kaikki pumput alkuun pois ja laskennan aikana
```

```
//tarvittavat takaisin
```

```
//hätäjähdytyspumput pois
```

```
amodi "JND20AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JNG20AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JND30AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JNG30AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JND40AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JNG40AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
//kiertopiirin 1 hätäjähdytysjärjestelmä poistettu simuloinnista
```

```
//hätäsyöttövesipumput pois
```

```
amodi "LAS11AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "LAS21AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "LAS31AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "LAS41AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
//muutokset tapauksen 2a alkutilaan

//painemittausten bias-termi
//kuumat haarat
amodi "JEC10CP826" "ME_BIAS" "-2.5"
amodi "JEC20CP826" "ME_BIAS" "-2.5"
amodi "JEC30CP826" "ME_BIAS" "-2.5"
amodi "JEC40CP826" "ME_BIAS" "-2.5"

//paineistimen paine
amodi "JEF10CP801" "ME_BIAS" "-2.5"

//lämpötilamittausten bias-termi
amodi "RC_01_GI02" "ME_BIAS" "-2.5"
amodi "RC_01_GI03" "ME_BIAS" "-2.5"
amodi "RC_01_GI04" "ME_BIAS" "-2.5"
amodi "RC_01_GI05" "ME_BIAS" "-2.5"
amodi "RC_01_GI06" "ME_BIAS" "-2.5"
amodi "RC_01_GI07" "ME_BIAS" "-2.5"
amodi "RC_01_GI08" "ME_BIAS" "-2.5"
amodi "RC_01_GI09" "ME_BIAS" "-2.5"

//turbiinin venttiilien säätö
aexclude "SVC_MIN01"
amodi "YR" "ANALOG_VALUE" "95.75"

//alkutilan simuloinnin ajaksi lisätty simulointiin kemikaalien-
//ja tilavuudenjärjestelmä (KBA part 1 ja part 2)

//alkutilan simuloinnin ajaksi poistetut suojaustoiminnot
//palautetaan, kun tasapainotila saavutettu
aexclude "MD6311_OR03"
aexclude "MD6312_OR01"
aexclude "MD632_AND07"
aexclude "MD6471_SR02"
aexclude "MD6472_AND02"
aexclude "SP848_LVC01"
aexclude "SP848_LVC02"
aexclude "SP848_LVC03"
```



```
//lämpötilat IRWST ja LHSI-järjestelmän lämmönvaihtimet
amodi "IRWST_TANK1" "PO11_TEMPERATURE" "62"
amodi "IRWST_TANK2" "PO11_TEMPERATURE" "62"
amodi "IRWST_TANK3" "PO11_TEMPERATURE" "62"
amodi "IRWST_TANK4" "PO11_TEMPERATURE" "62"

amodi "JN10_PO01" "PO11_TEMPERATURE" "62"
amodi "JN10_PO04" "PO11_TEMPERATURE" "62"

amodi "JN20_PO01" "PO11_TEMPERATURE" "62"
amodi "JN20_PO02" "PO11_TEMPERATURE" "62"

amodi "JN30_PO01" "PO11_TEMPERATURE" "62"
amodi "JN30_PO02" "PO11_TEMPERATURE" "62"

amodi "JN40_PO01" "PO11_TEMPERATURE" "62"
amodi "JN40_PO02" "PO11_TEMPERATURE" "62"

//reaktorin pikasulun muokkaaminen tehty käsin

//turbiinin pikasulun viive oikein
amodi "TUTR_BDL01" "DELAY_UP" "2.4"

//Jotta osittainen jäädytys toimii, simulointiin lisätty
//"RT on high core power level" -diagrammi

//reaktorin tehon laskenta MSRT venttiilien säätöä varten
//muokattu käsin

//MSRT venttiilien virtausten viritys
amodi "LBA13AA101" "VA12_DISCHARGE_COEFF" "0.41963"
amodi "LBA23AA101" "VA12_DISCHARGE_COEFF" "0.41963"
amodi "LBA33AA101" "VA12_DISCHARGE_COEFF" "0.41963"
amodi "LBA43AA101" "VA12_DISCHARGE_COEFF" "0.41963"

//MSRT asetusarvot
amodi "MSRCV_1_XA07" "ANALOG_VALUE" "97"
amodi "MSRCV_1_XA25" "ANALOG_VALUE" "97"
amodi "MSRCV_1_XA33" "ANALOG_VALUE" "97"
amodi "MSRCV_1_SP02" "SP_VALUE" "97"
```

```
amodi "MSRCV_2_XA11" "ANALOG_VALUE" "97"  
amodi "MSRCV_2_XA21" "ANALOG_VALUE" "97"  
amodi "MSRCV_2_XA29" "ANALOG_VALUE" "97"  
amodi "MSRCV_2_SPO2" "SP_VALUE" "97"  
  
amodi "MSRCV_3_XA11" "ANALOG_VALUE" "97"  
amodi "MSRCV_3_XA21" "ANALOG_VALUE" "97"  
amodi "MSRCV_3_XA29" "ANALOG_VALUE" "97"  
amodi "MSRCV_3_SPO2" "SP_VALUE" "97"  
  
amodi "MSRCV_4_XA11" "ANALOG_VALUE" "97"  
amodi "MSRCV_4_XA21" "ANALOG_VALUE" "97"  
amodi "MSRCV_4_XA29" "ANALOG_VALUE" "97"  
amodi "MSRCV_4_SPO2" "SP_VALUE" "97"  
  
//MSRT viiveet muokattu käsin  
  
//vikaoletukset, kaikki pumput alkuun pois ja laskennan aikana  
//tarvittavat takaisin  
  
//häätäjäähdytyspumput pois  
amodi "JND10APO01" "PU11_MALFUNCTION" "2"  
amodi "JNG10APO01" "PU11_MALFUNCTION" "2"  
amodi "JND20APO01" "PU11_MALFUNCTION" "2"  
amodi "JNG20APO01" "PU11_MALFUNCTION" "2"  
amodi "JND30APO01" "PU11_MALFUNCTION" "2"  
amodi "JNG30APO01" "PU11_MALFUNCTION" "2"  
amodi "JND40APO01" "PU11_MALFUNCTION" "2"  
amodi "JNG40APO01" "PU11_MALFUNCTION" "2"  
  
//kiertopiirin 2 järjestelmän takaiskuventtiilissä vika  
amodi "JNG23AA005" "VA17_MALFUNCTION" "3"  
  
//hätäsyöttövesipumput pois  
amodi "LAS11APO01" "PU11_MALFUNCTION" "2"  
amodi "LAS21APO01" "PU11_MALFUNCTION" "2"  
amodi "LAS31APO01" "PU11_MALFUNCTION" "2"  
amodi "LAS41APO01" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
//muutokset tapauksen 2b alkutilaan
```

```
//EFWS käynnistyminen LOOPista ja hätäjähdytys-signaalista
```

```
amodi "LAR11AA105_R01" "DC2_OUTPUT_VALUE" "1"
```

```
amodi "LAR21AA105_R01" "DC2_OUTPUT_VALUE" "1"
```

```
amodi "LAR31AA105_R01" "DC2_OUTPUT_VALUE" "1"
```

```
amodi "LAR41AA105_R01" "DC2_OUTPUT_VALUE" "1"
```

```
//muuten sama kuin 2a, muutokset vikaoletuksiin
```

```
//vikaoletukset, kaikki pumput alkuun pois ja laskennan aikana
```

```
//tarvittavat takaisin
```

```
//hätäjähdytyspumput pois
```

```
amodi "JND10AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JNG10AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JND20AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JNG20AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JND30AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JNG30AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JND40AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JNG40AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
//hätäsyöttövesipumput pois
```

```
amodi "LAS11AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "LAS21AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "LAS31AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "LAS41AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
//muutokset tapauksen 2c alkutilaan
```

```
//EFWS käynnistyminen LOOPista ja hätäjähdytys-signaalista
```

```
amodi "LAR11AA105_R01" "DC2_OUTPUT_VALUE" "1"
```

```
amodi "LAR21AA105_R01" "DC2_OUTPUT_VALUE" "1"
```

```
amodi "LAR31AA105_R01" "DC2_OUTPUT_VALUE" "1"
```

```
amodi "LAR41AA105_R01" "DC2_OUTPUT_VALUE" "1"
```

```
//muuten sama kuin 2a, muutokset vikaoletuksiin
```

```
//vikaoletukset, kaikki pumput alkuun pois ja laskennan aikana
```

```
//tarvittavat takaisin
```

```
//hätäjähdytyspumput pois
```

```
amodi "JND10AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JNG10AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JND20AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JNG20AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JND30AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JNG30AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JND40AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "JNG40AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
//kiertopiirin 1 järjestelmän takaiskuventtiilissä vika
```

```
amodi "JNG13AA005" "VA17_MALFUNCTION" "3"
```

```
//hätäsyöttövesipumput pois
```

```
amodi "LAS11AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "LAS21AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "LAS31AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "LAS41AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
//muutokset tapauksen 3 alkutilaan

//paineistimen varoventtiilin virtauksen viritys
amodi "JEF10AA191" "VA13_DISCHARGE_COEFF" "0.8685"

//varoventtiiliä ennen oleva putki ja piste lisätty käsin
//putken ja pisteen ominaisuudet muokattu käsin

//paineistimen noodien määrän muutos
amodi "JEF10BBO01" "PR11_VOLUME_NUMBER" "100"

//lämpötilat IRWST
amodi "IRWST_TANK1" "PO11_TEMPERATURE" "20"
amodi "IRWST_TANK4" "PO11_TEMPERATURE" "20"

//painerajojen min2p ja min3p korjaaminen
amodi "RT_01_LVC03" "LVC_LIMIT_VALUE" "137.5"
amodi "RT_01_LVC04" "LVC_LIMIT_VALUE" "117.5"

//painerajan min1p korjaaminen
amodi "RT_08_LVC03" "LVC_LIMIT_VALUE" "124.5"
amodi "RT_08_LVC03" "LVC_HYSTERESIS" "5"
amodi "RT_08_LVC04" "LVC_LIMIT_VALUE" "124.5"
amodi "RT_08_LVC04" "LVC_HYSTERESIS" "5"
amodi "RT_08_LVC05" "LVC_LIMIT_VALUE" "124.5"
amodi "RT_08_LVC05" "LVC_HYSTERESIS" "5"
amodi "RT_08_LVC06" "LVC_LIMIT_VALUE" "124.5"
amodi "RT_08_LVC06" "LVC_HYSTERESIS" "5"

//alkutilan simuloinnin ajaksi lisätty simulointiin kemikaalien-
//ja tilavuudenjärjestelmä (KBA part 1 ja part 2)

//alkutilan simuloinnin ajaksi poistetut suojaustoiminnot
//palautetaan, kun tasapainotila saavutettu
aexclude "MD6311_OR03"
aexclude "MD6312_OR01"
aexclude "MD632_AND07"
aexclude "MD6471_SR02"
aexclude "MD6472_AND02"
aexclude "SP848_LVC01"
```

```
aexclude "SP848_LVC02"
aexclude "SP848_LVC03"

//kemikaalien- ja tilavuudenjärjestelmän sulkeminen tehty käsin

//reaktorin pikasulun muokkaaminen tehty käsin

//turbiinin pikasulun viive oikein
amodi "TUTR_BDL01" "DELAY_UP" "2.4"

//EFWS käynnistyminen LOOPista ja hätäjähdytys-signaalista
amodi "LAR11AA105_R01" "DC2_OUTPUT_VALUE" "1"
amodi "LAR41AA105_R01" "DC2_OUTPUT_VALUE" "1"

//Jotta osittainen jäähdytys toimii, simulointiin lisätty
//"RT on high core power level" -diagrammi

//reaktorin tehon laskenta MSRT venttiilien säätöä varten
//muokattu käsin

//MSRT venttiilien virtausten viritys
amodi "LBA13AA101" "VA12_DISCHARGE_COEFF" "0.46186"
amodi "LBA23AA101" "VA12_DISCHARGE_COEFF" "0.46186"
amodi "LBA33AA101" "VA12_DISCHARGE_COEFF" "0.46186"
amodi "LBA43AA101" "VA12_DISCHARGE_COEFF" "0.46186"

//MSRT viiveet muokattu käsin

//vikaoletukset, kaikki pumput alkuun pois ja laskennan aikana
//tarvittavat takaisin

//hätäjähdytyspumput pois
amodi "JND10AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "JNG10AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "JND40AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "JNG40AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"

//kiertopiirien 2 ja 3 hätäjähdytysjärjestelmät poistettu simuloinnista

//hätäsyöttövesipumput pois
```

```
amodi "LAS11AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"  
amodi "LAS21AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"  
amodi "LAS31AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"  
amodi "LAS41AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
//paineakkujen takaiskuventtiilit kiinni  
amodi "JNG13AA009" "VA17_MALFUNCTION" "3"  
amodi "JNG43AA009" "VA17_MALFUNCTION" "3"
```

C LASKENTATAPAUSTEN SIMULOINTITIEDOSTOT

```
//tapaus 1, 2A-LOCA

//datankirjoitus alkaa
syncWrite(\_->consoleCommand currentModel "io open IS07")

//tehon määrävältä diagrammilta asetusarvo pois
amodi "SP01" "SP_VALUE" "0"

//paineistimen lämmitin manuaalille
amodi "JEF10BB001_R01" "DC2_CONTROL_STATE" "3"

step 29.9

//aika-askel pieneksi juuri ennen vuodon alkua
amodi "ECC0" "MAXIMUM_TIME_STEP" "1.000000e-03"
amodi "ECC0" "CURRENT_TIME_STEP" "1.000000e-03"

step 0.1

//alkutapahtuma
amodi "VUOT01" "VA11_POSITION" "1"
amodi "VUOT01" "VA11_POSITION_SET_POINT" "1"

amodi "VUOT02" "VA11_POSITION" "1"
amodi "VUOT02" "VA11_POSITION_SET_POINT" "1"

//ettei vuotoventtiilien väliseen putkeen mene mitään
amodi "JEC_PIP02" "PI12_LOSS_COEFF" "1e+20"

step 8.5

//LOOP simulointi, alkaa turbiinin pikasulusta
```



```
//syöttövesipumput pois
amodi "LAC14AP002" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC14AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC13AP002" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC13AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC12AP002" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC12AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"

//lauhdepumput pois
amodi "LCB13AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LCB12AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"

//paineistimen lämmintin pois
amodi "JEF10BB001_R01" "DC2_OUTPUT_VALUE" "0"

//pääkiertopumput pois
amodi "BBD10GS001" "ES_SW_STATUS" "false"
amodi "BBC08GS001" "ES_SW_STATUS" "false"
amodi "BBB03GS001" "ES_SW_STATUS" "false"
amodi "BBA08GS001" "ES_SW_STATUS" "false"

step 30

//MHSI-pumppu käynnistyy
amodi "JND40AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"

step 6

//LHSI-pumppu käynnistyy
amodi "JNG40AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"

step 6

//CCFL muokkaus alasmienotilan pystyhaaroihin, kun akkusyöttö loppuu
amodi "JAA10BR010" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR020" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR030" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR040" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR050" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR060" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
```

amodi "JAA10BR070" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR080" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR090" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"

amodi "JAA10BR110" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR123" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR133" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR143" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR153" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR163" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR170" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR180" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR190" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"

amodi "JAA10BR210" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR220" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR230" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR240" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR250" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR260" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR270" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR280" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR290" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"

amodi "JAA10BR310" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR324" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR334" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR344" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR354" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR364" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR370" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR380" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR390" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"

amodi "JAA10BR410" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR420" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR430" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR440" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR450" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR460" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"

amodi "JAA10BR470" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR480" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR490" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"

amodi "JAA10BR510" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR524" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR534" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR544" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR554" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR564" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR570" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR580" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR590" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"

amodi "JAA10BR610" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR620" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR630" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR640" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR650" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR660" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR670" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR680" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR690" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"

amodi "JAA10BR012" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR112" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR212" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR312" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR412" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR512" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR612" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR712" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"

amodi "JAA10BR714" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR724" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR734" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR744" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR754" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR764" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
amodi "JAA10BR774" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"

```
amodi "JAA10BR784" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"  
amodi "JAA10BR794" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
```

```
amodi "JAA10BR092" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"  
amodi "JAA10BR192" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"  
amodi "JAA10BR292" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"  
amodi "JAA10BR392" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"  
amodi "JAA10BR492" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"  
amodi "JAA10BR592" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"  
amodi "JAA10BR697" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"  
amodi "JAA10BR796" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
```

```
amodi "JAA10BR095" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"  
amodi "JAA10BR195" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"  
amodi "JAA10BR295" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"  
amodi "JAA10BR395" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"  
amodi "JAA10BR495" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"  
amodi "JAA10BR595" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"  
amodi "JAA10BR698" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"  
amodi "JAA10BR797" "BR_OUT_IN_FLOW_DISTANCE" "1.135"
```

step 14

```
//EFWS-pumput käynnistyvät
```

```
amodi "LAS11AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
```

```
amodi "LAS41AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
```

step 735.5

```
//datankirjoitus loppuu
```

```
syncWrite(\_->consoleCommand currentModel "io close IS07")
```

```
//tapaus 2a, paineistimen yhdyslinja

//datankirjoitus alkaa
syncWrite(\_->consoleCommand currentModel "io open IS07")

//tehon määrävältä diagrammilta asetusarvo pois
amodi "SP01" "SP_VALUE" "0"

step 29.9

//aika-askel pieneksi juuri ennen vuodon alkua
amodi "ECC0" "MAXIMUM_TIME_STEP" "1.000000e-03"
amodi "ECC0" "CURRENT_TIME_STEP" "1.000000e-03"

step 0.1

//alkutapahtuma
amodi "VUOT01" "VA11_POSITION" "1"
amodi "VUOT01" "VA11_POSITION_SET_POINT" "1"

amodi "VUOT02" "VA11_POSITION" "1"
amodi "VUOT02" "VA11_POSITION_SET_POINT" "1"

//ettei vuotoventtiilien väliseen putkeen mene mitään
amodi "JEC_PIP02" "PI12_LOSS_COEFF" "1e+20"

step 37.3

//MHSI-pumput käynnistyvät
amodi "JND20AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
amodi "JND30AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
amodi "JND40AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"

step 6

//LHSI-pumput käynnistyvät
amodi "JNG10AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
amodi "JNG20AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
amodi "JNG30AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
amodi "JNG40AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
```

step 20

```
//EFWS-pumput käynnistyvät
```

```
amodi "LAS11AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
```

```
amodi "LAS21AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
```

```
amodi "LAS31AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
```

```
amodi "LAS41AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
```

step 436.7

```
//datankirjoitus loppuu
```

```
syncWrite(\_->consoleCommand currentModel "io close IS07")
```

```
//tapaus 2b, paineistimen yhdyslinja

//datankirjoitus alkaa
syncWrite(\_->consoleCommand currentModel "io open IS07")

//tehon määrävältä diagrammilta asetusarvo pois
amodi "SP01" "SP_VALUE" "0"

step 29.9

//aika-askel pieneksi juuri ennen vuodon alkua
amodi "ECCO" "MAXIMUM_TIME_STEP" "1.000000e-03"
amodi "ECCO" "CURRENT_TIME_STEP" "1.000000e-03"

step 0.1

//alkutapahtuma
amodi "VUOT01" "VA11_POSITION" "1"
amodi "VUOT01" "VA11_POSITION_SET_POINT" "1"

amodi "VUOT02" "VA11_POSITION" "1"
amodi "VUOT02" "VA11_POSITION_SET_POINT" "1"

//ettei vuotoventtiilien väliseen putkeen mene mitään
amodi "JEC_PIP02" "PI12_LOSS_COEFF" "1e+20"

step 7.3

//LOOP simulointi, alkaa turbiinin pikasulusta
//syöttövesipumput pois
amodi "LAC14AP002" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC14AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC13AP002" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC13AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC12AP002" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC12AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"

//lauhdepumput pois
amodi "LCB13AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LCB12AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
//pääkiertopumput pois
amodi "BBD10GS001" "ES_SW_STATUS" "false"
amodi "BBC08GS001" "ES_SW_STATUS" "false"
amodi "BBB03GS001" "ES_SW_STATUS" "false"
amodi "BBA08GS001" "ES_SW_STATUS" "false"

step 30

//MHSI-pumput käynnistyvät
amodi "JND10APO01" "PU11_MALFUNCTION" "0"
amodi "JND40APO01" "PU11_MALFUNCTION" "0"

step 6

//LHSI-pumput käynnistyvät
amodi "JNG10APO01" "PU11_MALFUNCTION" "0"
amodi "JNG40APO01" "PU11_MALFUNCTION" "0"

step 20

//EFWS-pumput käynnistyvät
amodi "LAS11APO01" "PU11_MALFUNCTION" "0"
amodi "LAS41APO01" "PU11_MALFUNCTION" "0"

step 436.7

//datankirjoitus loppuu
syncWrite(\_->consoleCommand currentModel "io close IS07")
```



```
//tapaus 2c, paineistimen yhdyslinja

//datankirjoitus alkaa
syncWrite(\_->consoleCommand currentModel "io open IS07")

//tehon määrävältä diagrammilta asetusarvo pois
amodi "SP01" "SP_VALUE" "0"

step 29.9

//aika-askel pieneksi juuri ennen vuodon alkua
amodi "ECC0" "MAXIMUM_TIME_STEP" "1.000000e-03"
amodi "ECC0" "CURRENT_TIME_STEP" "1.000000e-03"

step 0.1

//alkutapahtuma
amodi "VUOT01" "VA11_POSITION" "1"
amodi "VUOT01" "VA11_POSITION_SET_POINT" "1"

amodi "VUOT02" "VA11_POSITION" "1"
amodi "VUOT02" "VA11_POSITION_SET_POINT" "1"

//ettei vuotoventtiilien väliseen putkeen mene mitään
amodi "JEC_PIP02" "PI12_LOSS_COEFF" "1e+20"

step 7.3

//LOOP simulointi, alkaa turbiinin pikasulusta
//syöttövesipumput pois
amodi "LAC14AP002" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC14AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC13AP002" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC13AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC12AP002" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC12AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"

//lauhdepumput pois
amodi "LCB13AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LCB12AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
//pääkiertopumput pois
amodi "BBD10GS001" "ES_SW_STATUS" "false"
amodi "BBC08GS001" "ES_SW_STATUS" "false"
amodi "BBB03GS001" "ES_SW_STATUS" "false"
amodi "BBA08GS001" "ES_SW_STATUS" "false"

step 30

//MHSI-pumput käynnistyvät
amodi "JND10AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
amodi "JND20AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
amodi "JND40AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"

step 6

//LHSI-pumput käynnistyvät
amodi "JNG10AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
amodi "JNG20AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
amodi "JNG40AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"

step 20

//EFWS-pumput käynnistyvät
amodi "LAS11AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
amodi "LAS21AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
amodi "LAS41AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"

step 436.7

//datankirjoitus loppuu
syncWrite(\_->consoleCommand currentModel "io close IS07")
```

```
//tapaus 3, PSV avautuminen

//datankirjoitus alkaa
syncWrite(\_->consoleCommand currentModel "io open IS07")

//tehon määrävältä diagrammilta asetusarvo pois
amodi "SP01" "SP_VALUE" "0"

//PSV toimilaite pois
aexclude "JEF10AA191_S01"

step 29.9

//aika-askel pieneksi juuri ennen vuodon alkua
amodi "ECC0" "MAXIMUM_TIME_STEP" "1.000000e-03"
amodi "ECC0" "CURRENT_TIME_STEP" "1.000000e-03"

step 0.1

//alkutapahtuma

//PSV auki
amodi "JEF10AA191" "VA13_POSITION_SET_POINT" "1"

step 10

//aika-askel isommaksi
amodi "ECC0" "MAXIMUM_TIME_STEP" "5.000000e-03"

step 38.8

//aika-askel isommaksi
amodi "ECC0" "MAXIMUM_TIME_STEP" "1.000000e-02"

//LOOP simulointi, alkaa paineen alittaessa 122 bar
//syöttövesipumput pois
amodi "LAC14AP002" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC14AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC13AP002" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC13AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
amodi "LAC12AP002" "PU11_MALFUNCTION" "2"  
amodi "LAC12AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
//lauhdepumput pois
```

```
amodi "LCB13AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"  
amodi "LCB12AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
```

```
//pääkiertopumput pois
```

```
amodi "BBD10GS001" "ES_SW_STATUS" "false"  
amodi "BBC08GS001" "ES_SW_STATUS" "false"  
amodi "BBB03GS001" "ES_SW_STATUS" "false"  
amodi "BBA08GS001" "ES_SW_STATUS" "false"
```

```
step 30
```

```
//MHSI-pumput käyntiin
```

```
amodi "JND10AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"  
amodi "JND40AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
```

```
step 26
```

```
//EFWS-pumput käyntiin
```

```
amodi "LAS11AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"  
amodi "LAS41AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
```

```
step 895.2
```

```
//aika-askel isommaksi
```

```
amodi "ECC0" "MAXIMUM_TIME_STEP" "5.000000e-02"
```

```
step 2000
```

```
//datankirjoitus loppuu
```

```
syncWrite(\_->consoleCommand currentModel "io close IS07")
```

```
//tapaus 3, PSV ja MSRT avautuminen

//datankirjoitus alkaa
syncWrite(\_->consoleCommand currentModel "io open IS07")

//tehon määrävältä diagrammilta asetusarvo pois
amodi "SP01" "SP_VALUE" "0"

//PSV toimilaite pois
aexclude "JEF10AA191_S01"

//MSRT säätöventtiilien säätö pois
aexclude "MSRCON_ASW01"
aexclude "MSRCON_ASW02"
aexclude "MSRCON_ASW03"
aexclude "MSRCON_ASW04"

step 29.9

//aika-askel pieneksi juuri ennen vuodon alkua
amodi "ECC0" "MAXIMUM_TIME_STEP" "1.000000e-03"
amodi "ECC0" "CURRENT_TIME_STEP" "1.000000e-03"

step 0.1

//alkutapahtuma

//PSV auki
amodi "JEF10AA191" "VA13_POSITION_SET_POINT" "1"

//MSRT auki
amodi "LBA13AA001" "VA13_POSITION_SET_POINT" "1"
amodi "LBA23AA001" "VA13_POSITION_SET_POINT" "1"
amodi "LBA33AA001" "VA13_POSITION_SET_POINT" "1"
amodi "LBA43AA001" "VA13_POSITION_SET_POINT" "1"

step 10

//aika-askel isommaksi
amodi "ECC0" "MAXIMUM_TIME_STEP" "5.000000e-03"
```

step 28.5

```
//aika-askel isommaksi
amodi "ECC0" "MAXIMUM_TIME_STEP" "1.000000e-02"

//LOOP simulointi, alkaa paineen alittaessa 122 bar
//syöttövesipumpur pois
amodi "LAC14AP002" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC14AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC13AP002" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC13AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC12AP002" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LAC12AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"

//lauhdepumput pois
amodi "LCB13AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"
amodi "LCB12AP001" "PU11_MALFUNCTION" "2"

//pääkiertopumput pois
amodi "BBD10GS001" "ES_SW_STATUS" "false"
amodi "BBC08GS001" "ES_SW_STATUS" "false"
amodi "BBB03GS001" "ES_SW_STATUS" "false"
amodi "BBA08GS001" "ES_SW_STATUS" "false"
```

step 30

```
//MHSI-pumput käyntiin
amodi "JND10AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
amodi "JND40AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
```

step 26

```
//EFWS-pumput käyntiin
amodi "LAS11AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
amodi "LAS41AP001" "PU11_MALFUNCTION" "0"
```

step 905.5

```
//aika-askel isommaksi
```

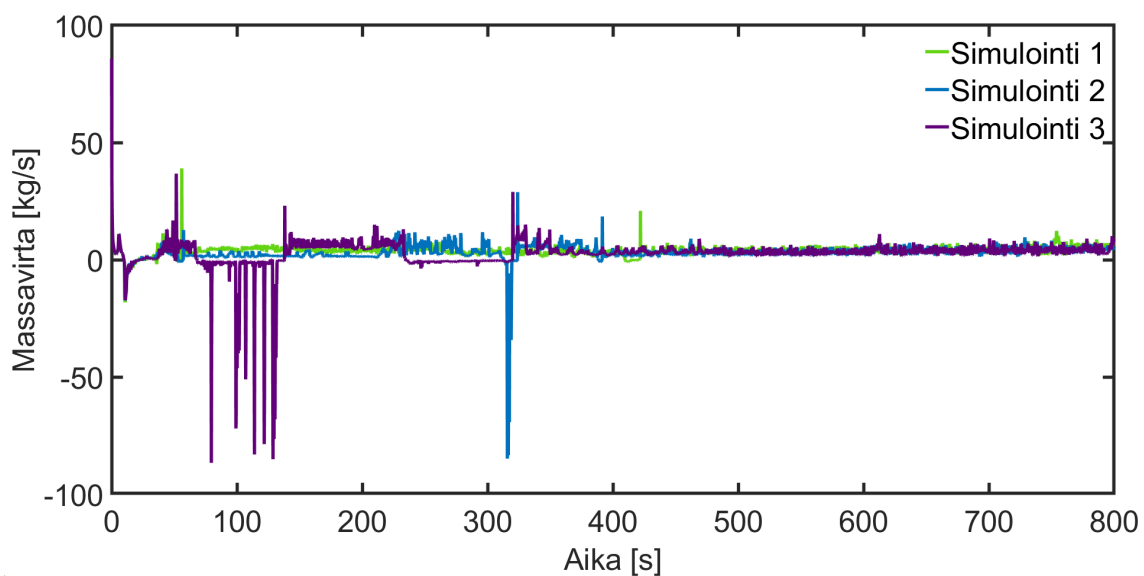
```
amodi "ECCO" "MAXIMUM_TIME_STEP" "5.000000e-02"
```

```
step 2000
```

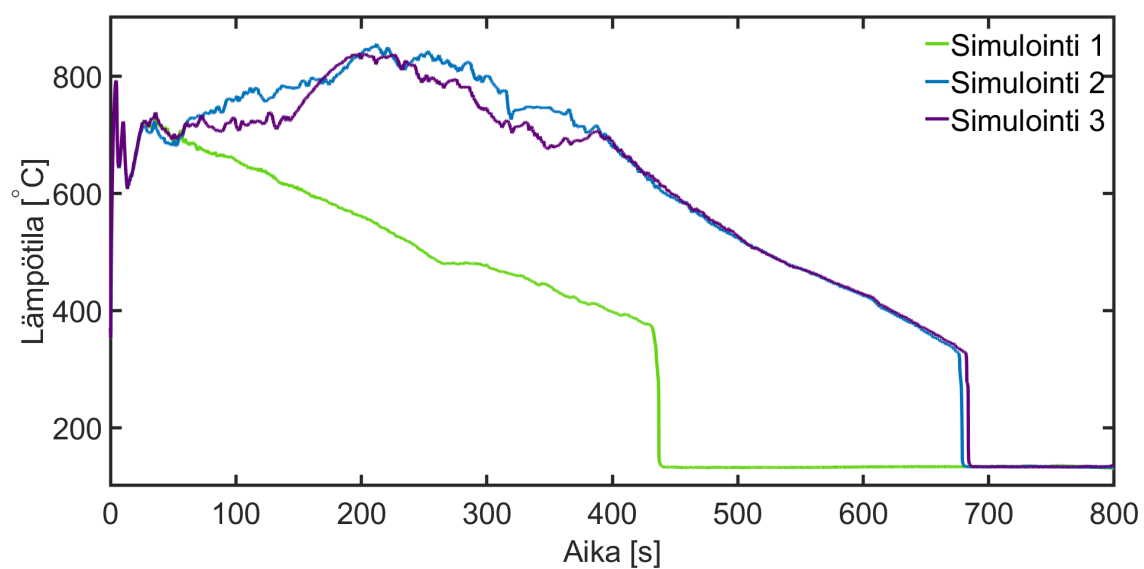
```
//datankirjoitus loppuu
```

```
syncWrite(\_->consoleCommand currentModel "io close IS07")
```

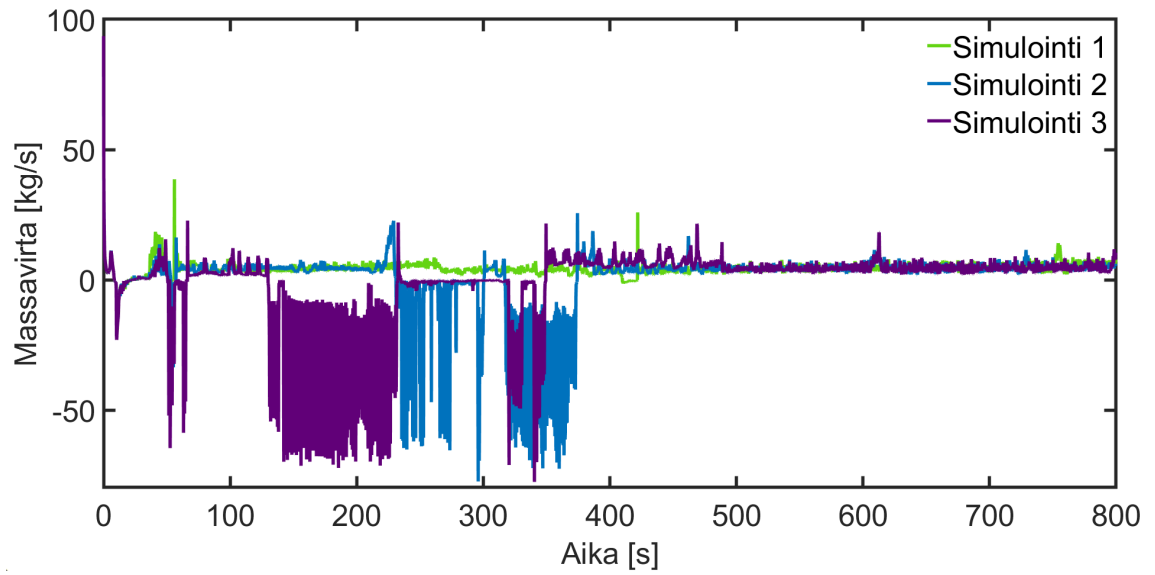
D LASKENTATAPAUKSEN 1 TULOSKUVIA (PERUSMALLIVERSIO)



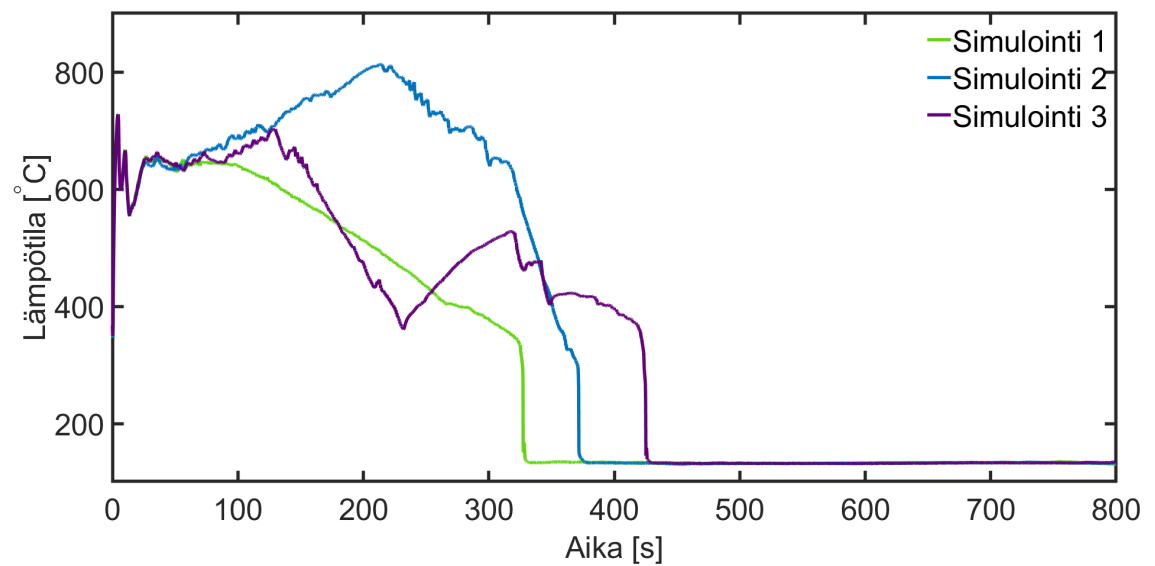
Kuva D.1. Massavirta kanavan 1 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan



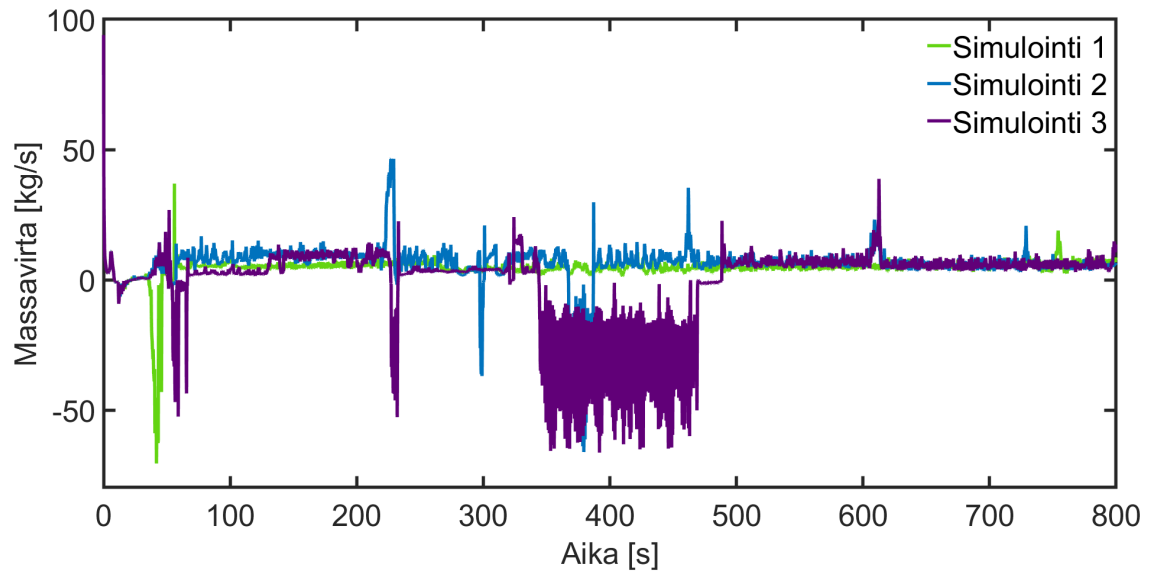
Kuva D.2. Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 1



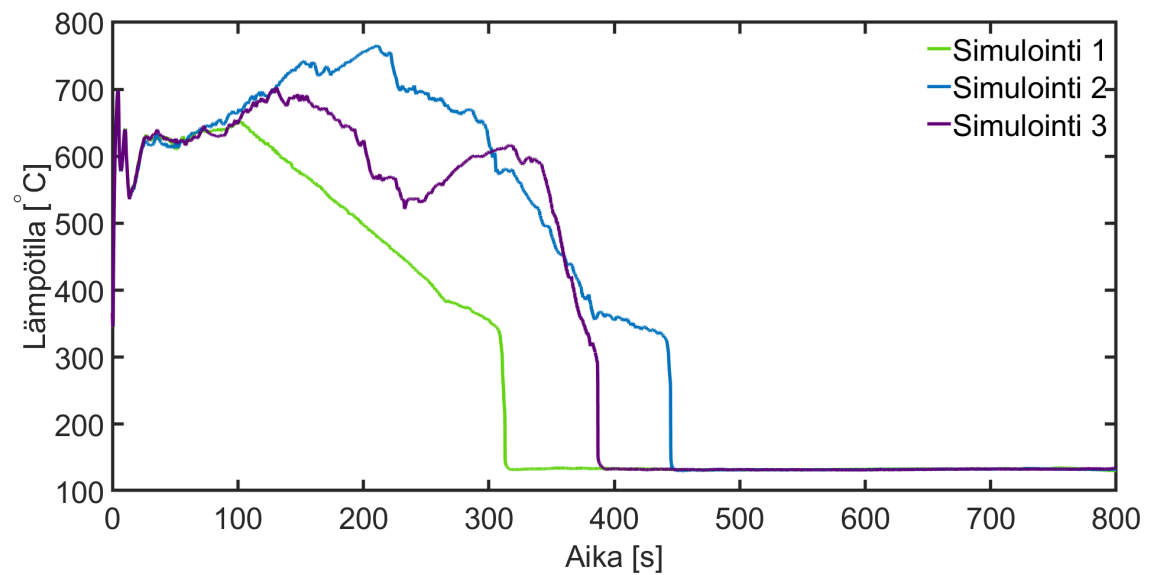
Kuva D.3. Massavirta kanavan 2 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan



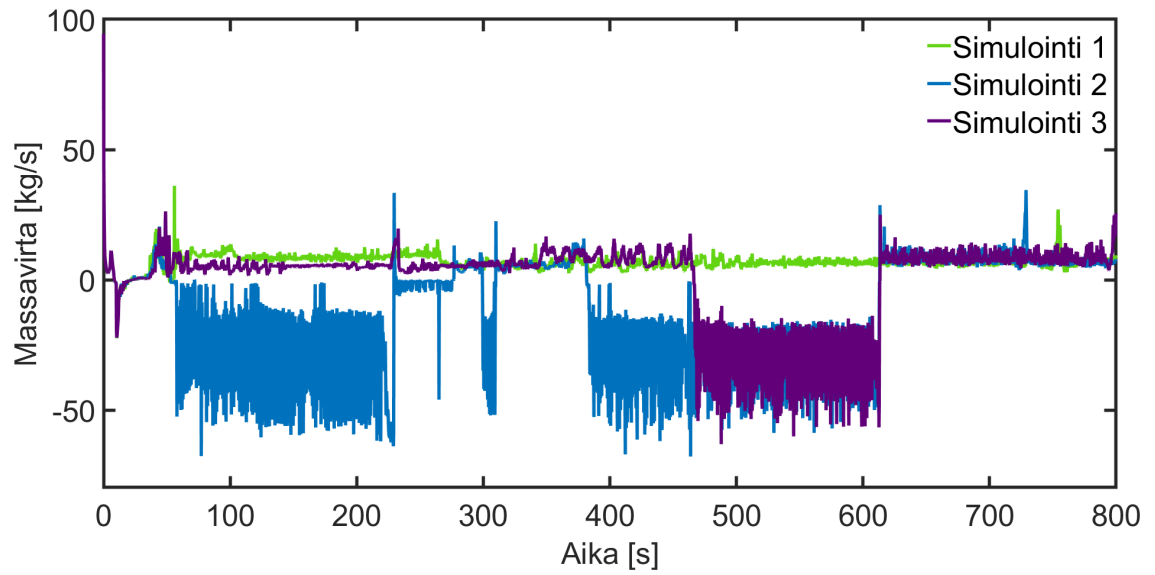
Kuva D.4. Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 2



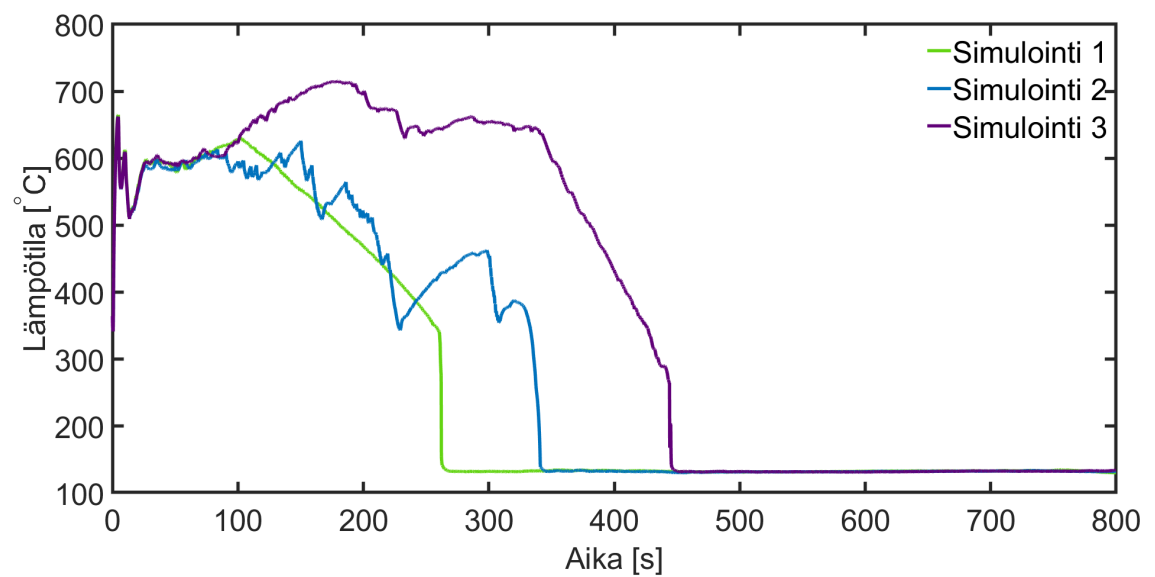
Kuva D.5. Massavirta kanavan 3 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan



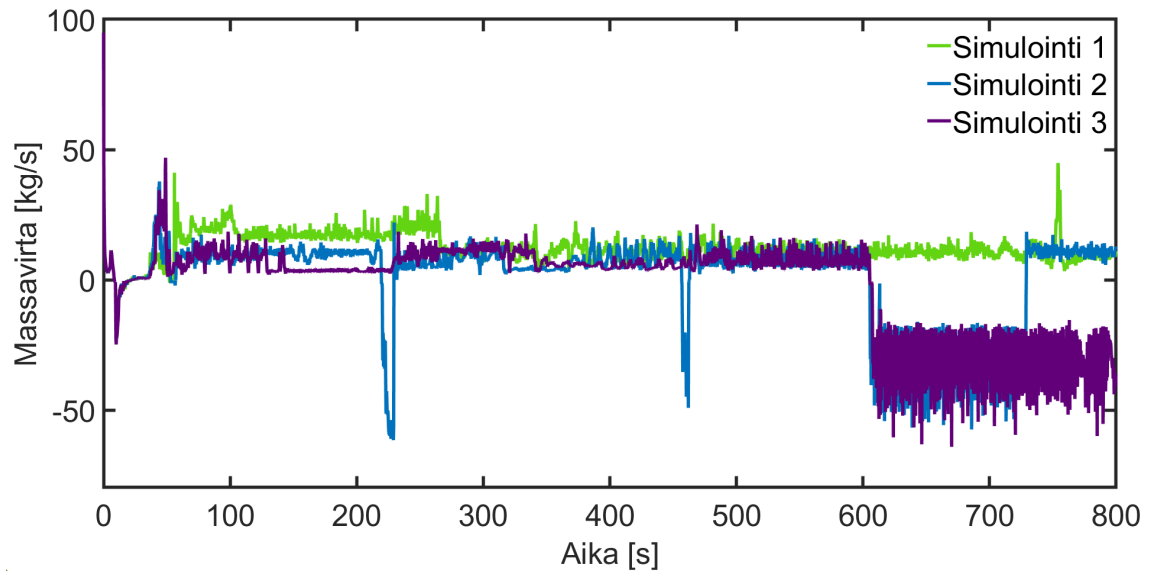
Kuva D.6. Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 3



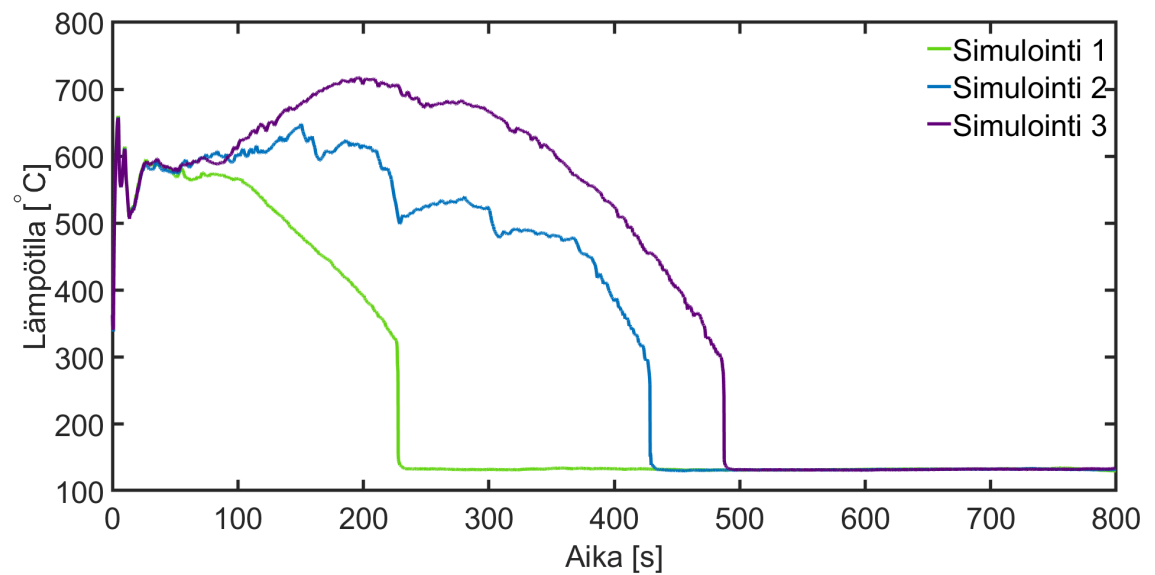
Kuva D.7. Massavirta kanavan 4 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan



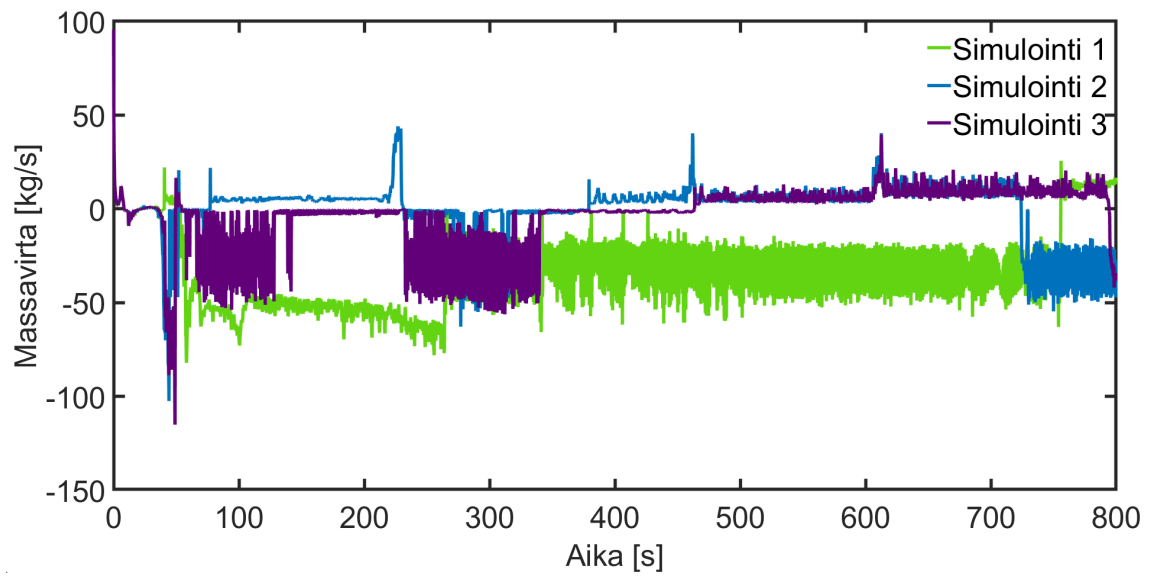
Kuva D.8. Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 4



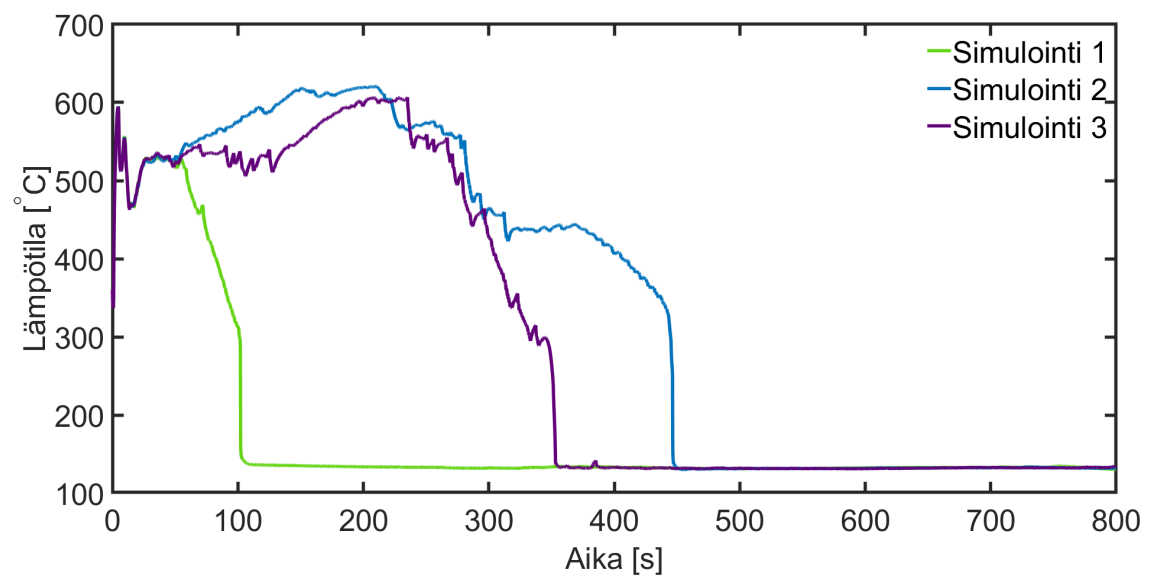
Kuva D.9. Massavirta kanavan 5 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan



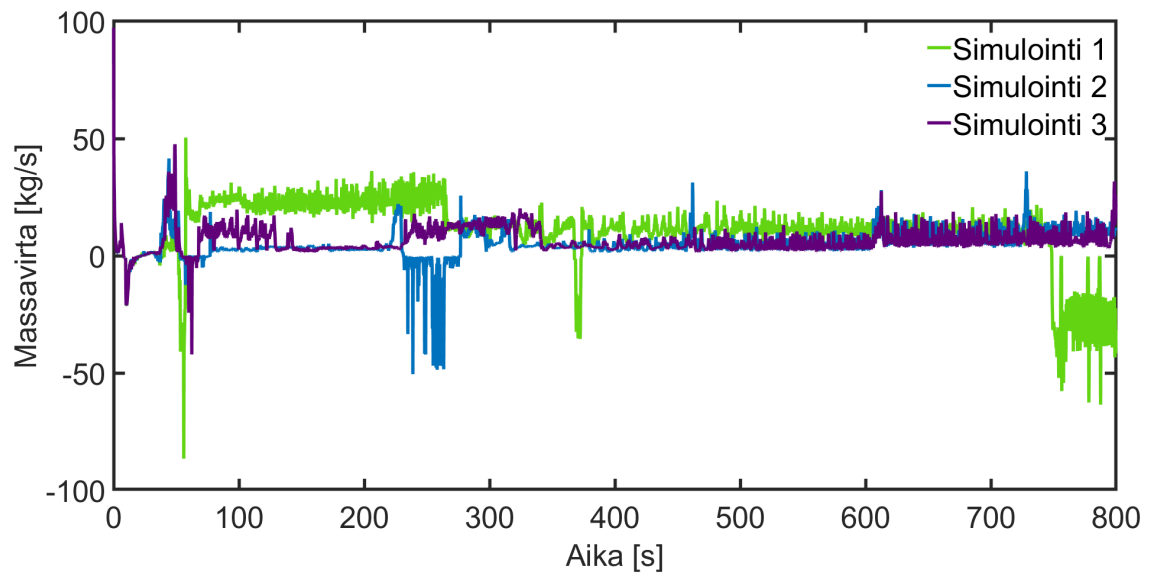
Kuva D.10. Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 5



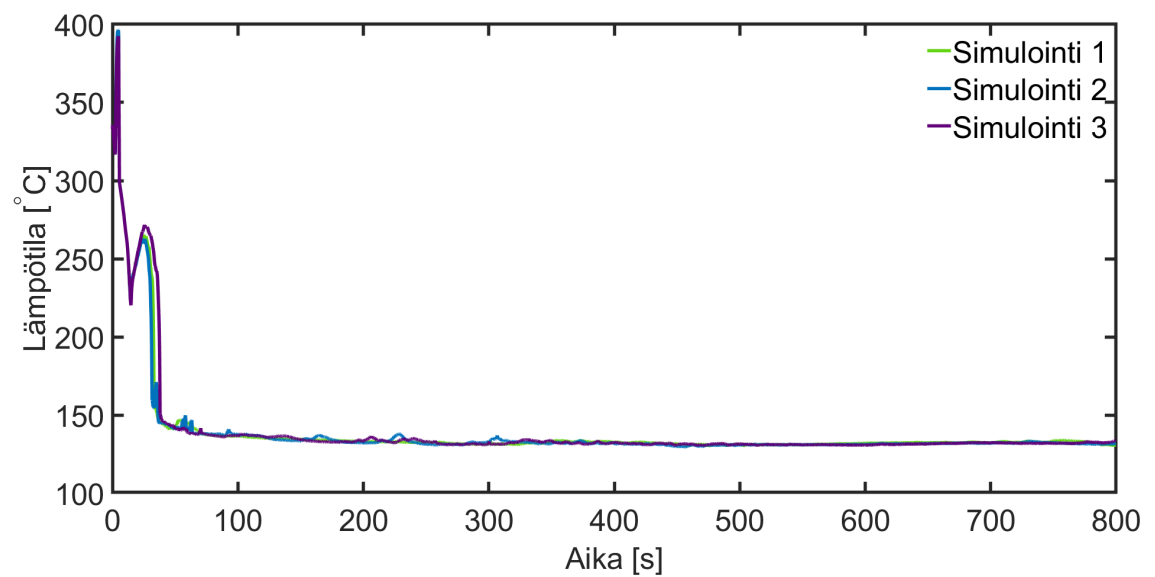
Kuva D.11. Massavirta kanavan 6 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan



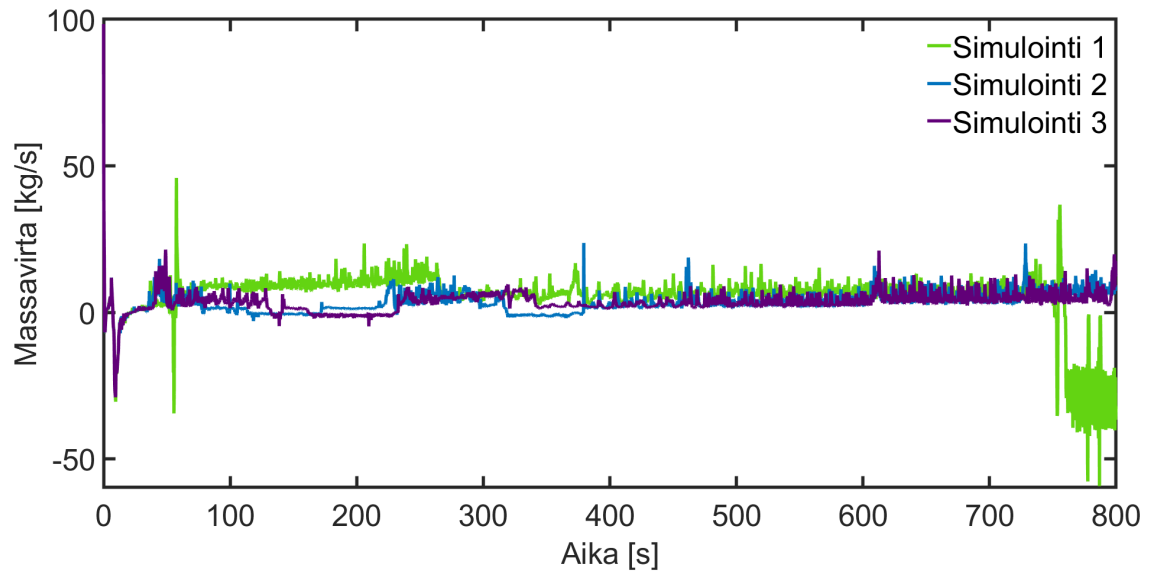
Kuva D.12. Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 6



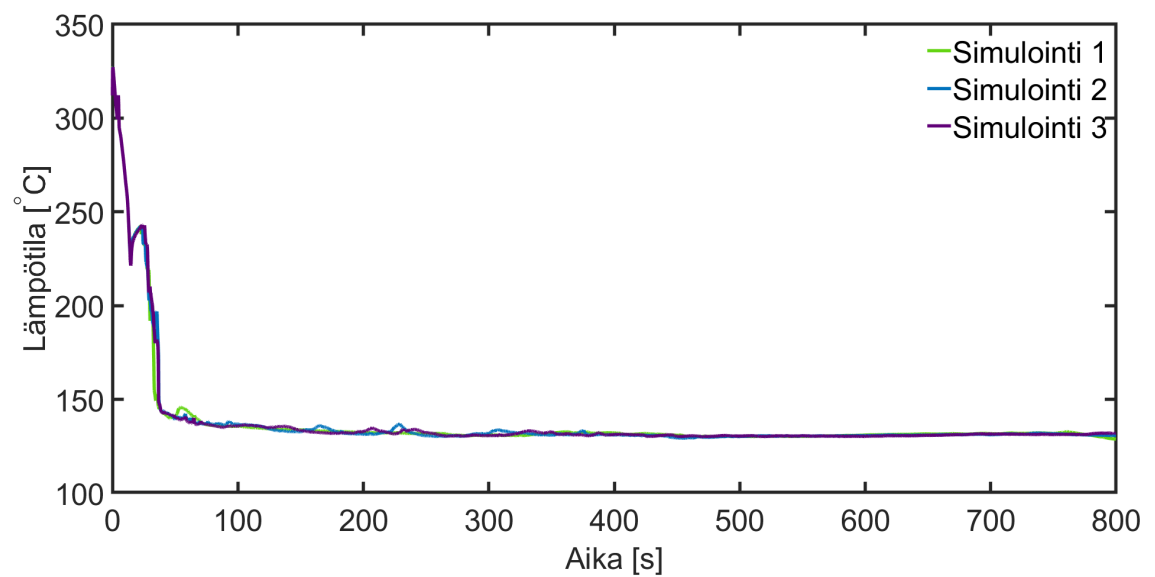
Kuva D.13. Massavirta kanavan 7 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan



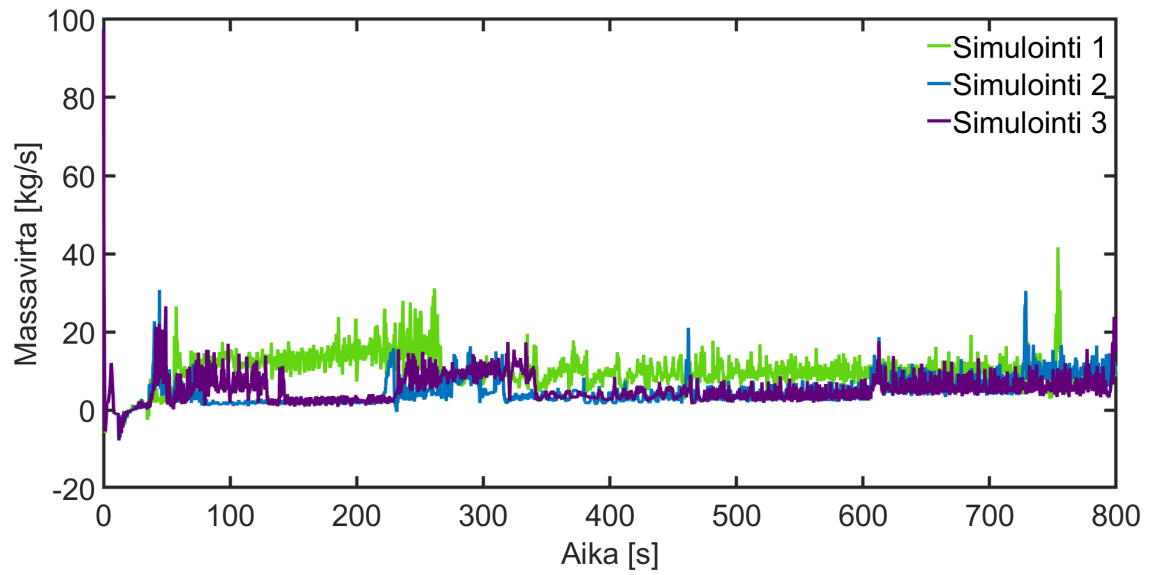
Kuva D.14. Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 7



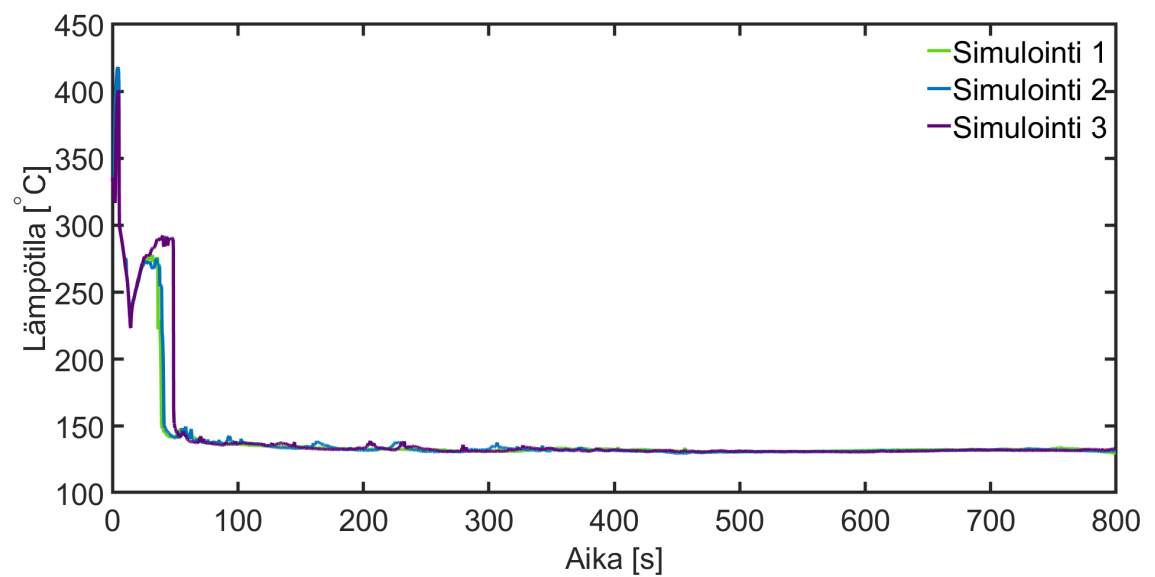
Kuva D.15. Massavirta kanavan 8 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan



Kuva D.16. Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 8

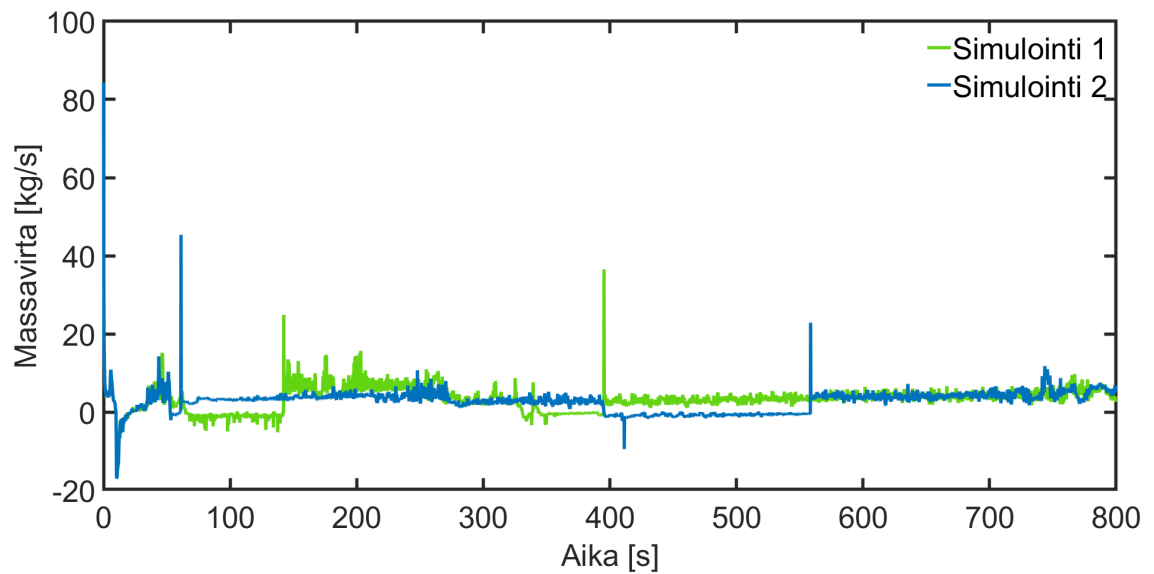


Kuva D.17. Massavirta kanavan 9 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan

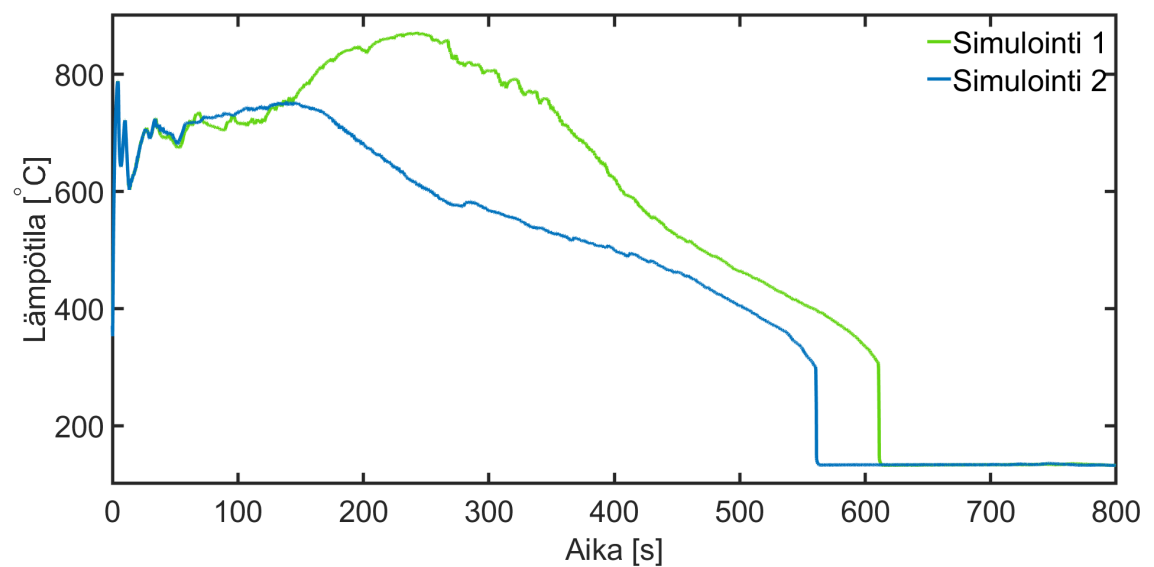


Kuva D.18. Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 9

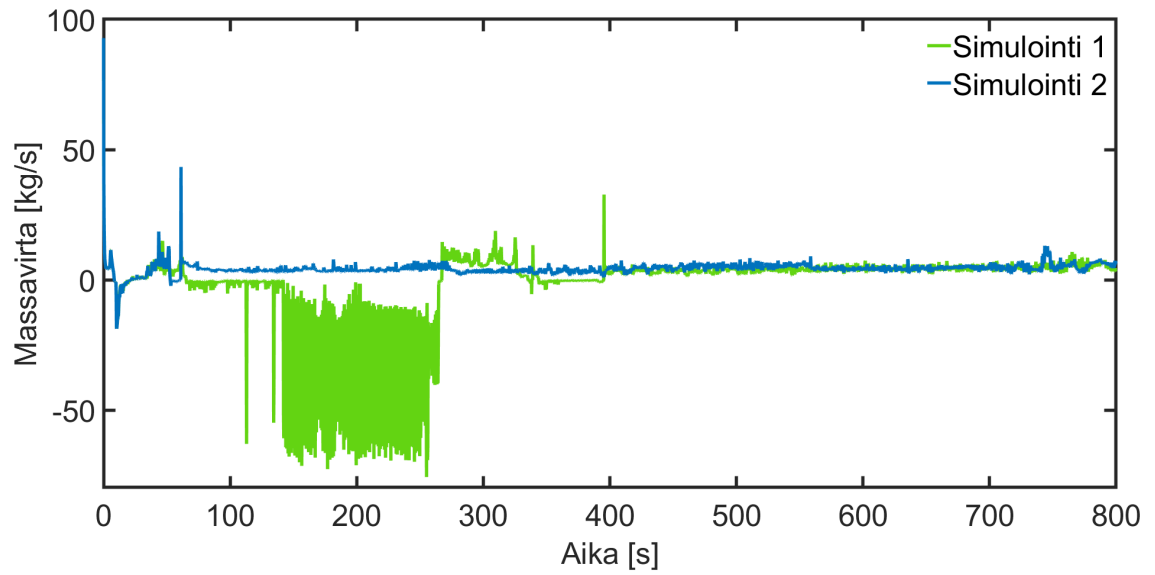
E LASKENTATAPAUKSEN 1 TULOSKUVIA (MALLIVERSIO OHJAUSPUTKILLA)



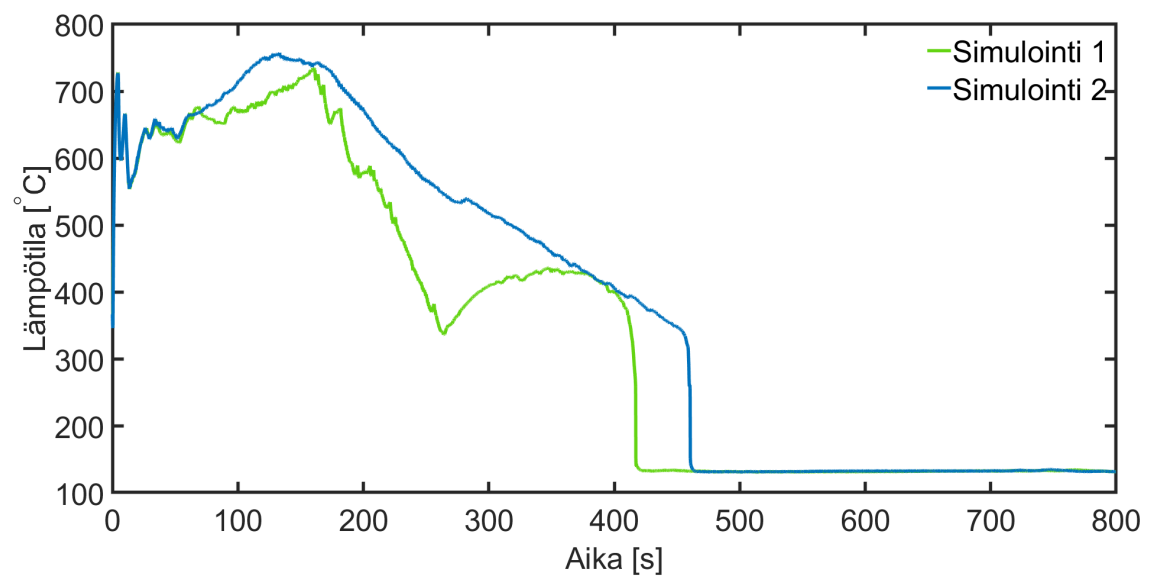
Kuva E.1. Massavirta kanavan 1 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan



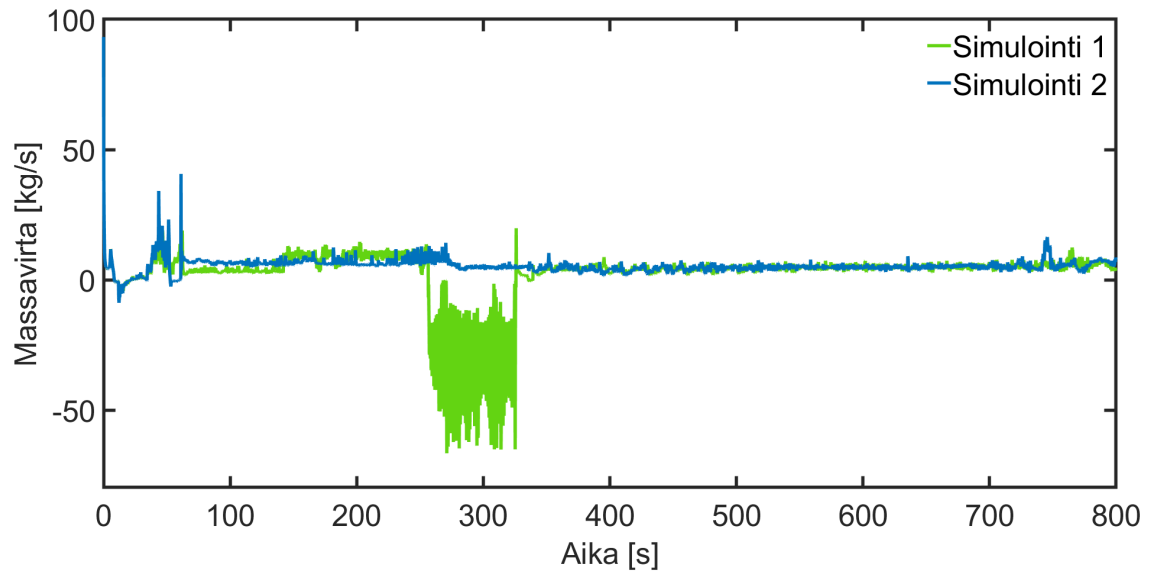
Kuva E.2. Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 1



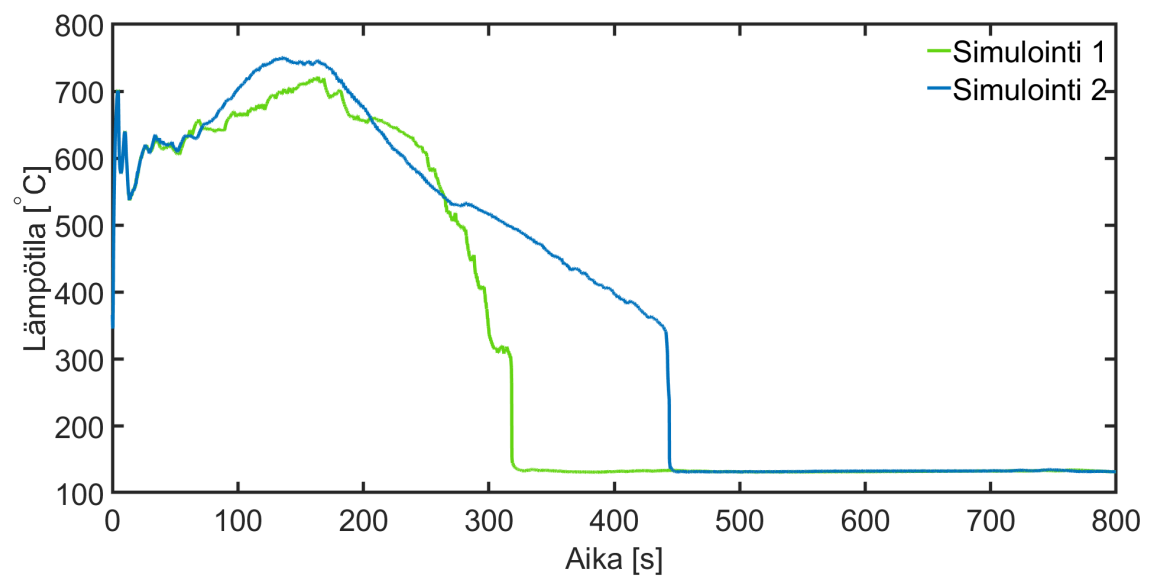
Kuva E.3. Massavirta kanavan 2 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan



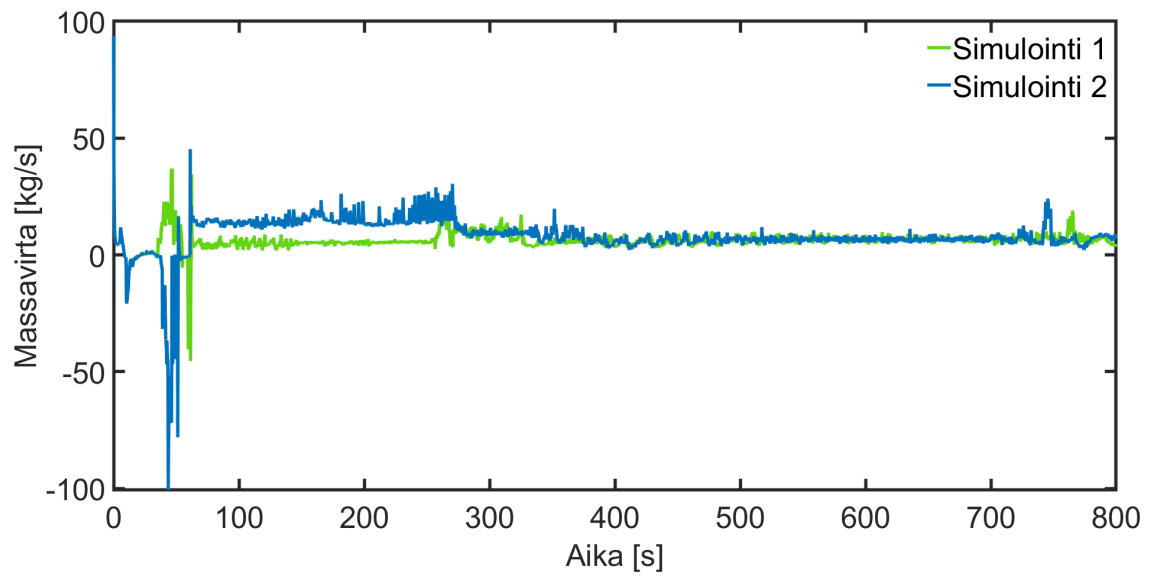
Kuva E.4. Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 2



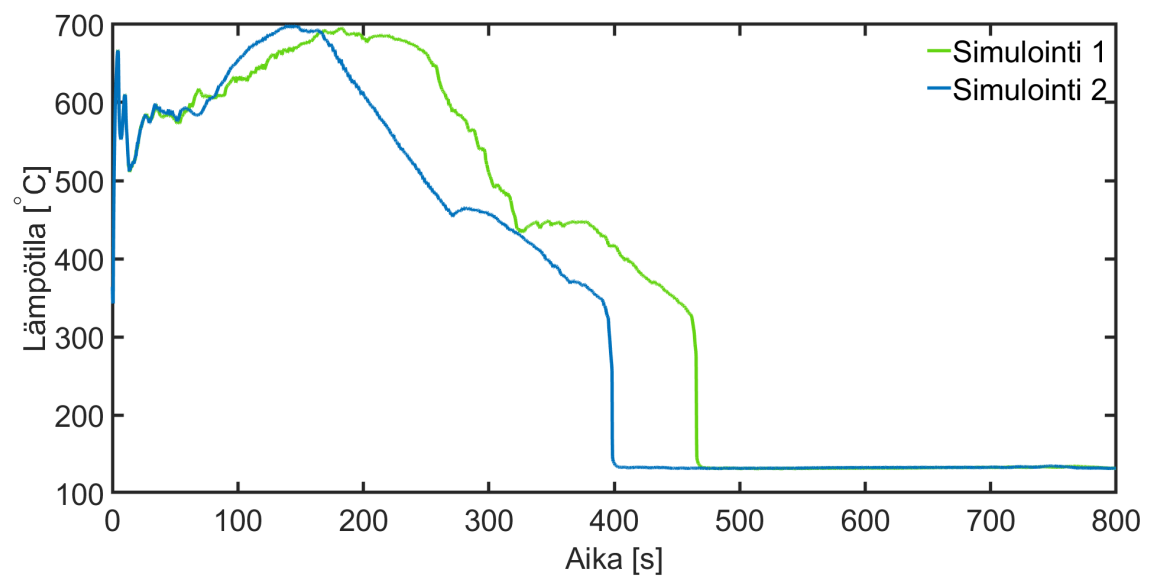
Kuva E.5. Massavirta kanavan 3 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan



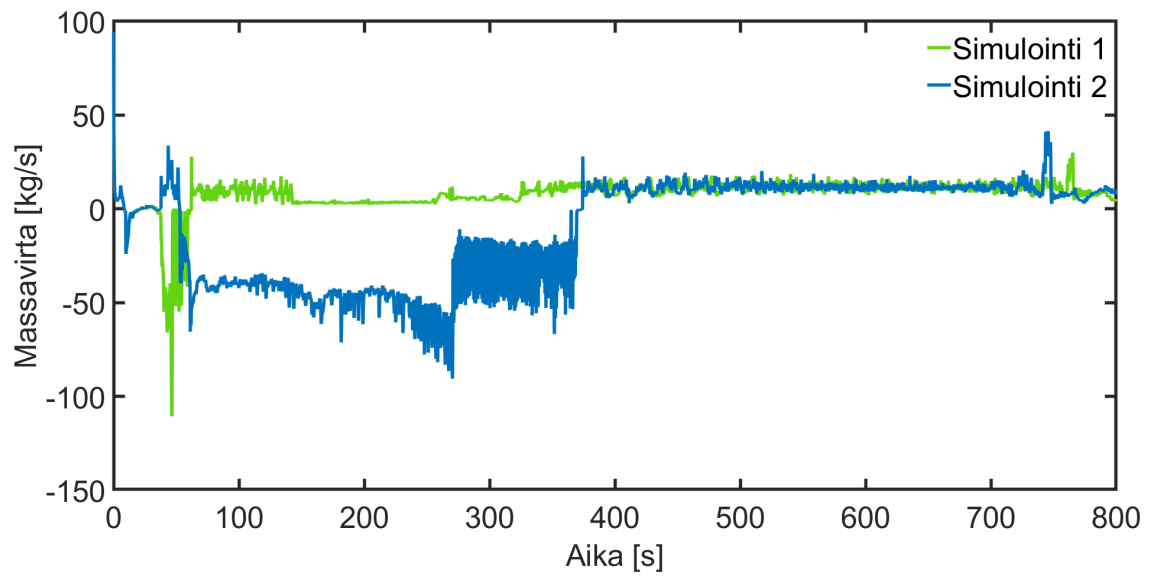
Kuva E.6. Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 3



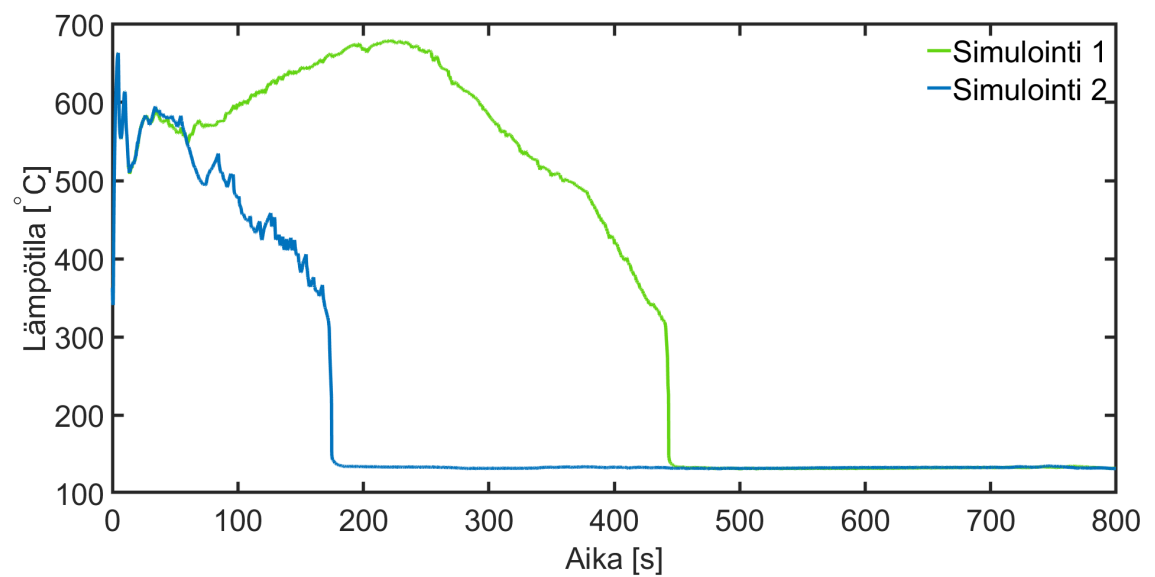
Kuva E.7. Massavirta kanavan 4 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan



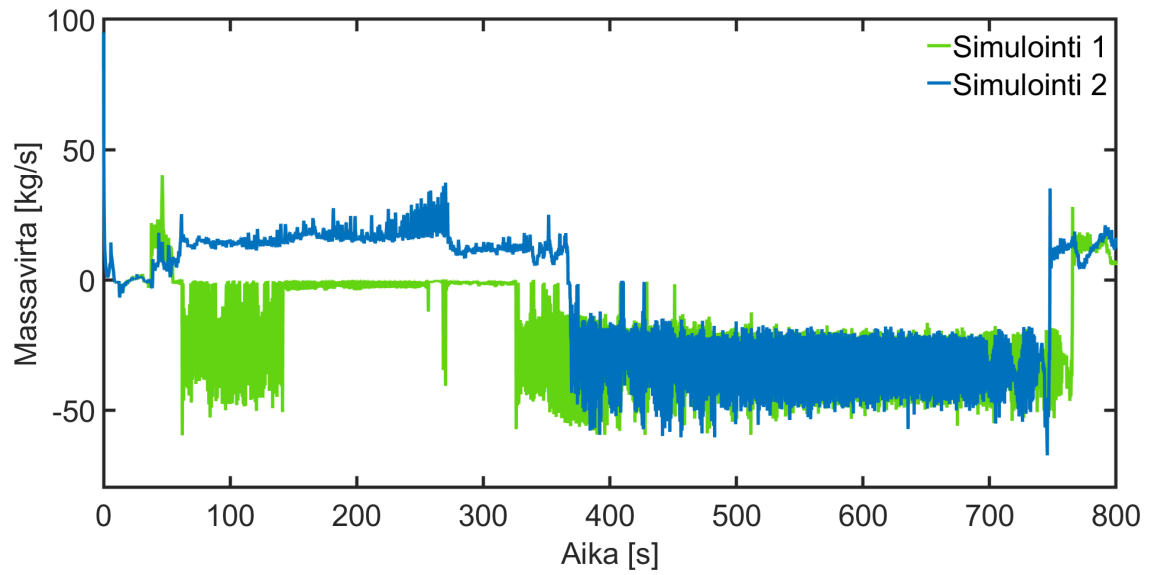
Kuva E.8. Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 4



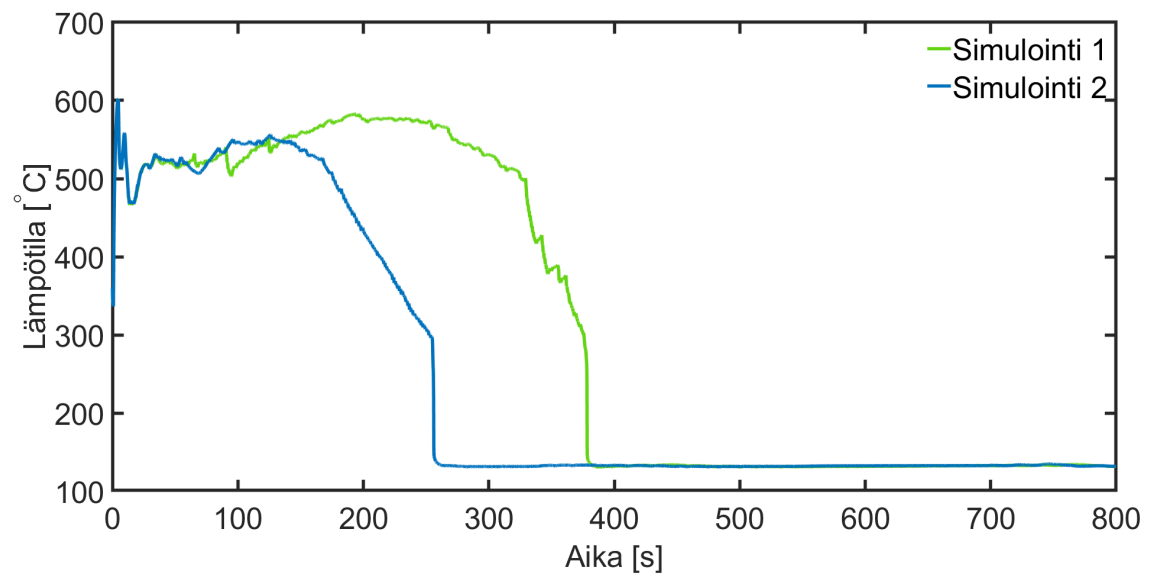
Kuva E.9. Massavirta kanavan 5 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan



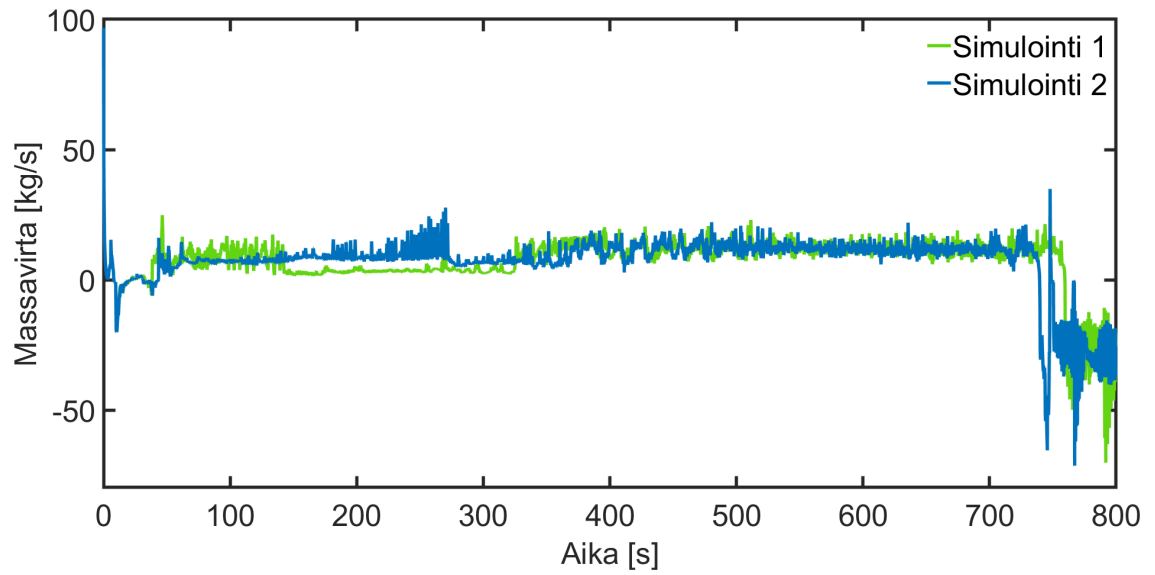
Kuva E.10. Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 5



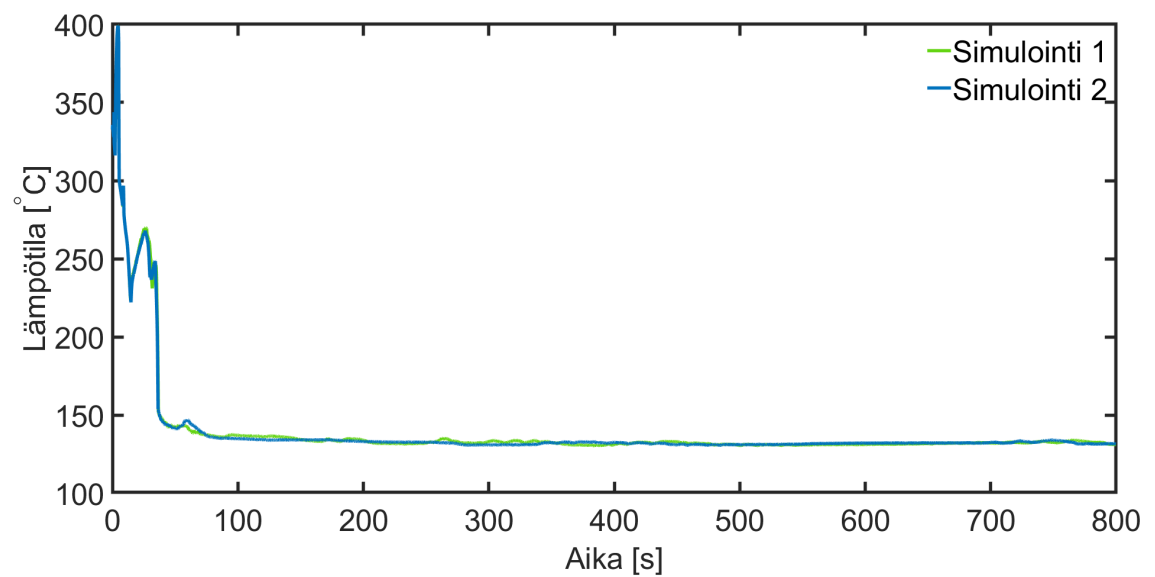
Kuva E.11. Massavirta kanavan 6 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan



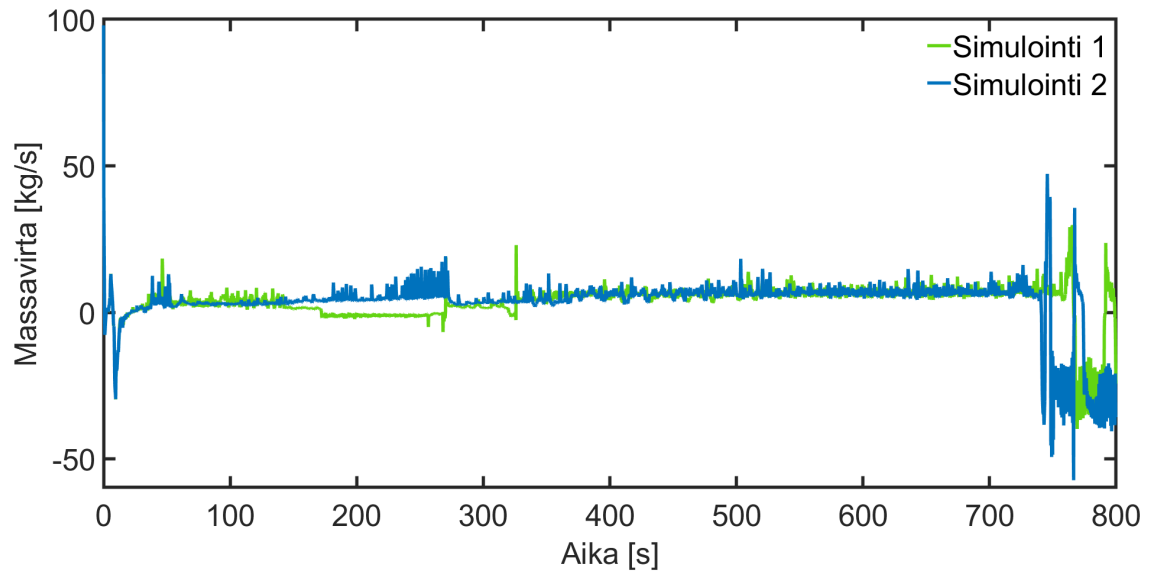
Kuva E.12. Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 6



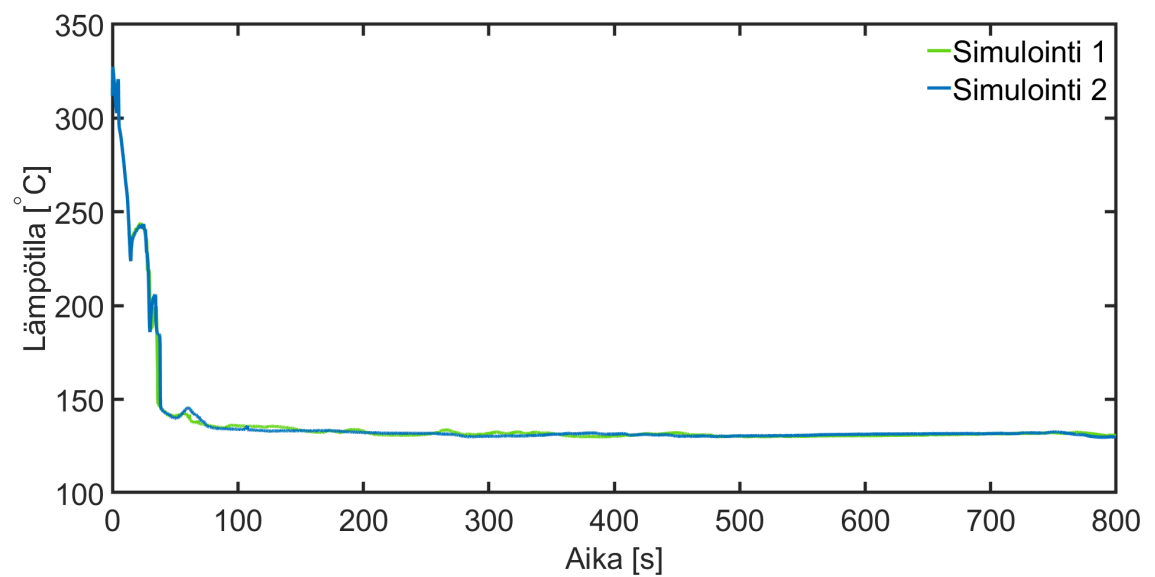
Kuva E.13. Massavirta kanavan 7 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan



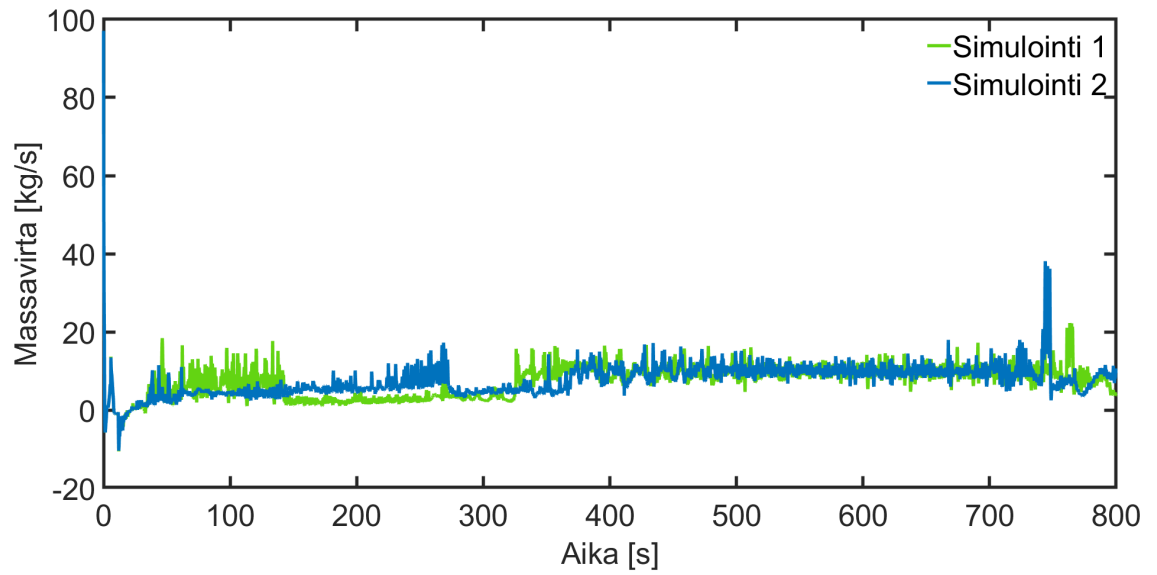
Kuva E.14. Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 7



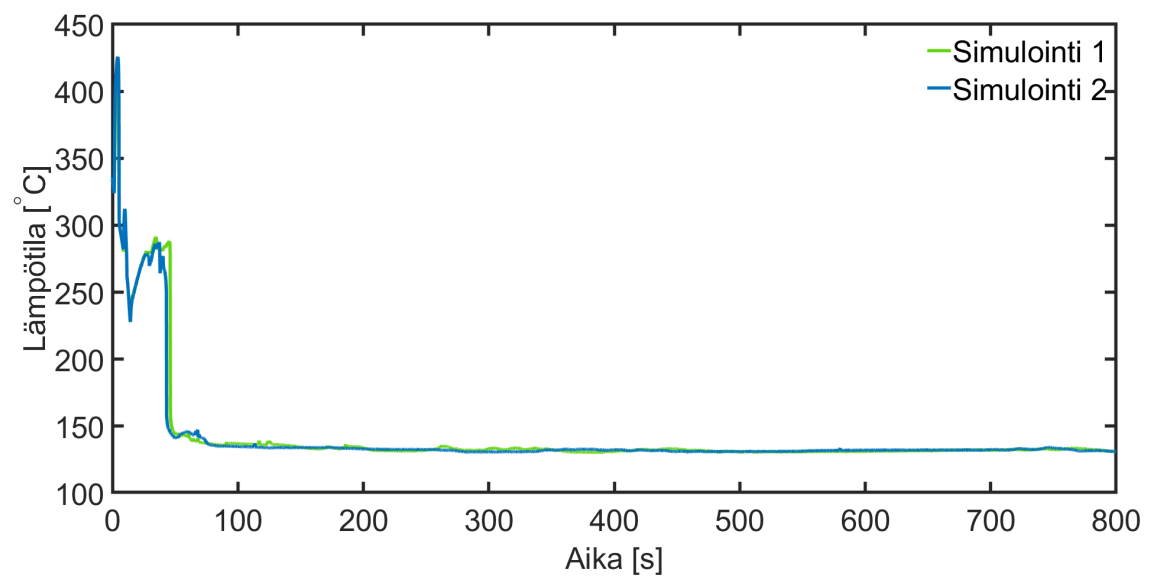
Kuva E.15. Massavirta kanavan 8 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan



Kuva E.16. Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 8



Kuva E.17. Massavirta kanavan 9 yllä yhtä polttoaine-elementtiä kohtaan



Kuva E.18. Suojakuoren maksimilämpötila laskentakanavassa 9