

LASKENTAMALLI PKL- KOELAITTEISTON PIENEN VUODON KOKEEN SIMULOIMISEKSI APROS- OHJELMALLA

Diplomityö

Pasi Junninen
Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energia- ja ympäristötekniikan osasto

Tarkastajat prof. Lasse Koskelainen, DI Eero Virtanen (STUK)
Ohjaaja DI Ismo Karppinen

STUKin raporttisarjoissa esitetyt johtopäätökset ovat tekijöiden johtopäätöksiä, eivätkä ne välttämättä edusta Säteilyturvakeskuksen virallista kantaa.

ISBN 952-478-029-1 (nid., Dark Oy, Vantaa 2005)
ISBN 952-478-030-5 (pdf)
ISSN 0785-9325

*JUNNINEN Pasi. (Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energia- ja ympäristötekniikan osasto).
Laskentamalli PKL-koelaitteiston pienen vuodon kokeen simuloimiseksi Apros-ohjelmistolla.
Diplomityö. STUK-YTO-TR 214. Helsinki 2005. 53 s. + liite 15 s.*

Avainsanat: Apros, boori, laskentamalli, pienen vuodon koe, PKL-koelaitteisto, simulointi

Tiivistelmä

Työn tavoitteena oli tehdä Apros-laskentamalli PKL-koelaitteistosta ja testata kuinka hyvin Apros pystyy laskemaan PKL-koelaitteistolla suoritettun E2.2 pienen vuodon kokeen. Tavoitteena oli myös tarkastella boorittoman veden tulpan etenemistä pienen vuodon kokeen aikana. PKL-koelaitteisto vastaa saksalaista sähköteholtaan 1300 MW olevaa Philippsburg 2 painevesilaitosta. Koelaitteiston tilavuudet ja teho on skaalattu kertoimella 145. Työssä tehdyllä laskentamallilla tarkasteltiin boorittoman veden tulpan liikkumista pienen vuodon kokeen aikana. Kun malli oli valmis, laskenta suoritettiin Apros 5.05 versiolla. Boorittoman veden tulpan etenemisen laskennassa käytettiin toisen kertaluvun diskretointia, jolla booripitoisuuden muutokset säilyvät teräväreunaisina.

Laskentamalli pystyi kuvaamaan koelaitteistolla suoritettussa pienen vuodon kokeessa tapahtuneet ilmiöt varsin hyvin. Eroa koetuloksiin tuli pääkiertopiirien luonnonkiertojen alkamishetkestä ja primääripaineen käyttäytymisessä. Kokeen alkutilanne ei ollut stationääritila, joten alkutilanteen asettamisessa oli hankaluuksia. Varsinkin pääkiertopiirien veden pinnankorkeuksien asettamisessa oli vaikeuksia, koska veden pinnankorkeuksien erot porxivät tasoittumaan nopeasti kokeen aikana.

Apros pystyi laskemaan PKL-koelaitteistolla suoritettun pienen vuodon kokeen hyvin. Mallilla tulisi kuitenkin laskea vielä toisentyypisiäkin kokeita, ennen kuin voidaan varmuudella tietää mallin toimivuus. PKL-koelaitteisto vastaa pääpiirteiltään Suomeen rakennettavaa Olkiluoto 3 ydinvoimalaitosta. Tehty työ antaa lisävarmuutta, kun Olkiluoto 3 laitoksen turvallisuustarkasteluita tehdään.

JUNNINEN Pasi. (Lappeenranta University of Technology, Energy and Environmental Technology). Apros simulation model to simulate small break loss of coolant accident in PKL test facility. Master's thesis. STUK-YTO-TR 214. Helsinki 2005. 53 pp. + Appendix 15 pp.

Keywords: Apros, boron dilution, Loss of Coolant Accident, PKL test facility, simulation

Abstract

This Master's thesis object was to model the PKL test facility with Apros code and to simulate small break loss of coolant accident (SBLOCA) with that simulation model. The second object was to examine how the lowest boron concentration slugs move during SBLOCA. The PKL test facility replicates a 1300 MW pressurized water reactor with elevations scaled to 1:1. The scaling factor for volumes and power is 1:145. The PKL test facility was modeled with Apros 5.05. The second order discretization of boron concentration in Apros 5.05 allows more precise simulation of sharp concentration changes.

The main phenomena in the PKL E2.2 test were reproduced quite well. However there were some differences on natural circulation onsets between the test facility and the simulation model. Primary pressure rose higher in the simulation model than in the test facility after low pressure safety injection pumps were operated. The onset of the test was not stationary situation. That presented some problems especially with setting water levels in steam generators.

Apros was able to calculate the SBLOCA experiment performed with the PKL test facility. However, different tests should be simulated with the model to validate it further. A new nuclear power plant, Olkiluoto 3, is under construction in Finland and the PKL test facility replicates Olkiluoto 3 quite well. The work done gives more confidence in using Apros in safety analysis of Olkiluoto 3.

Alkusanat

Tämä työ on tehty VTT Prosesseissa Espoossa Ydinvoimalaitostekniikan ryhmässä. Työn rahoitus on tullut Säteilyturvakeskukselta. Kiitokset molemmille organisaatioille mahdollisuudesta suorittaa mielenkiintoinen diplomityö. Kiitokset erikseen myös työn ohjajille ja tarkastajille. Kiitokset ansaitsevat myös DI Juha Poikolainen opastuksesta Aprosohjelman käyttöön ja DI Jukka Ylijoki Aprosin käytön ongelmien ratkaisussa.

Espoossa 16.5.2005

Pasi Junninen

Sisällys

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKUSANAT	5
LYHENNELUETTELO	8
SYMBOLILUETTELO	8
1 JOHDANTO	9
2 BOORI YDINVOIMALAITOKSESSA	11
2.1 Ydinreaktorin reaktiivisuuden hallinta	11
2.2 Boorin laimenemismekanismit painevesilaitoksessa	12
3 PKL-KOELAITTEISTO	13
3.1 Reaktorin sydän	13
3.2 Ylätila	13
3.3 Ylätilan ohitus	14
3.4 Alasmenotila	14
3.5 Reaktorin pääkiertopiirit	14
3.6 Pääkiertopumput	14
3.7 Höyrystimet	15
3.8 Paineistin	15
4 PIENEN VUODON KOE	16
4.1 Kokeen tavoite ja koejärjestely	16
4.2 Kokeen alkutilan saavuttaminen	17
4.3 Kokeen eteneminen	17
4.4 Tulokset	18
5 PKL-KOELAITTEISTON MALLINTAMINEN APROS-SIMULOINTIOHJELMALLA	20
5.1 Mallinnuksessa käytetyt komponentit	20
5.1.1 Prosessikomponentit	20
5.1.2 Ydintekniset komponentit	20
5.1.3 Automaatiokomponentit	21
5.1.4 Reunaehdot	21

5.2	Laskentaverkot	21
5.2.1	Reaktorin sydän	21
5.2.2	Reaktorin ylätila	22
5.2.3	Alasmenotila	23
5.2.4	Pääkiertopiirit	24
5.2.5	Paineistin	26
5.3	Mallin tilavuuksien asettaminen vastaamaan koelaitteistoa	26
5.4	Lämpöhäviöt	27
5.5	Painehäviöt	28
5.6	Boorittoman veden tulpan eteneminen kylmähaarassa	29
6	PIENEN VUODON KOKEEN SIMULOINTI APROS-MALLILLA	31
6.1	Alkutila	31
6.2	Kokeen eteneminen	31
6.3	Tulokset	33
6.3.1	Luonnonkierron alkaminen kiertopiireissä	34
6.3.2	Pinnankorkeudet	38
6.3.3	Booripitoisuudet	42
6.3.4	Vesilukkojen lämpötilat	49
7	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	51
	LÄHDELUETTELO	53
	LIITE	54

Lyhenneluettelo

APROS

Advanced Process Simulation Environment, teollisuusprosessien dynaamiseen simulointiin käytettävä ohjelmisto

GRADES

Graphical User Interface for APROS by Process Vision, APROS:n käyttöliittymä.

HPSI

High Pressure Safety Injection, korkeapaineinen hätäjähdytysruiskutus

KWU

Kraftwerk Union AG

LB

Large Break, suuri vuoto

LOCA

Loss of Coolant Accident, jäähdytteenmenetysonnettomuus

LPSI

Low Pressure Safety Injection, matalapaineinen hätäjähdytysruiskutus

NPSH

Net Positive Suction Head, pumpun imupuolen minimi nostokorkeus kavitoinnin välttämiseksi

OECD

Organization for Economic Co-operation and Development

PKL

Primärkreisläufe, primääripiiriä kuvaava

PRISE

Primary secondary leakage, primääri sekundäri vuoto

PWR

Pressurized Water Reactor, painevesireaktori

RELAP5/MOD3

Reactor Excursion and Leak Analysis Program, USA:ssa kehitetty onnettomuusanalyysiin sopiva termohydrauliikka ohjelmisto

SB

Small Break, pieni vuoto

SG

Steam Generator, höyrystin

SESAR

Senior Group of Experts on Nuclear Safety Research

SETH

SESAR Thermal hydraulics

Symboliluettelo

P	W	teho
Φ	W	lämpöhäviö
T	°C, K	lämpötila
c_p	J/kgK	ominaislämpökapasiteetti
g	m/s ²	putoamiskiihtyvyyys
t	s	aika
q_m	kg/s	massavirta
z	m	korkeustaso
ρ	kg/m ³	tiheys

1 Johdanto

Tässä työssä tarkastellaan booripitoisuuden muutoksia ydinvoimalaitoksen reaktorin primääripiiriä kuvaavassa PKL-koelaitteistossa (Primärkreislauf, Primary Coolant Loop) pienen vuodon kokeen aikana ja mallinnetaan kyseinen koelaitteisto Apros-simulointiohjelmalla. Koelaitteisto sijaitsee Saksassa ja sillä on tehty tammikuussa vuonna 2002 koe, joka on nimeltään PKL III E2.2 Inherent Boron Dilution during SB-LOCA. Kokeen tuloksia verrataan Apros-simulointimallilla saataviin tuloksiin.

Työn tavoitteena on mallintaa kyseinen koelaitteisto Apros-simulointiohjelmalla ja selvittää kuinka hyvin tällä mallilla lasketut tulokset vastaavat koelaitteistolla suoritettujen kokeiden tuloksia pienen vuodon tapauksessa. Apros-ohjelmistoa käytetään ydinvoimaloiden turvallisuuden varmistamiseen ja arviointiin. Ohjelmistoa haluttiin testata tekeillä simulointimalli pääpiirteiltään Olkiluoto 3-laitosta muistuttavasta PKL-koelaitteistosta. Ohjelman laskentakykyä ja tarkkuutta arvioidaan laskemalla erilaisia koelaitteistoilla tehtyjä kokeita ja vertaamalla laskentatuloksia mittaustuloksiin. PKL-koelaitteistosta oli selvä tarve saada Apros-simulointimalli, sillä aikaisemmin sellaista ei ollut. Koelaitteistosta on kuitenkin tehty simulointimallit ainakin amerikkalaisella RELAP5/MOD3 [1] ja saksalaisella ATHLET-ohjelmalla. Oli tärkeää saada malli myös suomalaisella Apros-ohjelmalla kansainvälisiä vertailuja varten.

Aluksi tässä työssä kerrotaan taustatietona ydinreaktorin reaktiivisuuden hallinnasta ja käsitellään sitä, miksi reaktorin vedessä on booria. Lisäksi käsitellään sitä mitä voi tapahtua, jos booripitoisuus pääsee onnettomuuden johdosta laimenemaan ja millaisia nämä booripitoisuutta laimentavat onnettomuudet ovat. Jos ydinreaktorin jäähdytysveden booripitoisuus pääsee laimenemaan ja kylmähaaraan muodostunut boorittoman veden tulppa pääsee etenemään reaktorin sydämeen

asti, voi tästä seurata hyvin nopea tehon nousu, polttoaine-elementtien ylikuumentuminen ja mahdollisesti vaurioituminen. Booripitoisuus saattaa päästä laimenemaan mm., jos kylmähaaraan tulee pieni vuoto, jolloin primääripiirin paine ja vesimäärä laskevat ja primääripuolen vesi höyrystyy reaktorissa ja taas lauhtuu höyrystimessä ja näin kylmähaaraan muodostuu booritonta vettä tai vettä, jossa booria on hyvin vähän. Edellä kuvattua onnettomuustilannetta kutsutaan nimellä SBLOCA (Small Break Loss of Coolant Accident).

Kolmannessa luvussa esitellään PKL-koelaitteisto. PKL-koelaitteisto kuvaa Siemens KWU:n sähköteholtaan 1300 MW painevesilaitosta, joka on saksalainen Philippsburg 2. Laitteiston korkeus-suhteet on rakennettu mittakaavaan 1:1, mutta teho ja tilavuudet on skaalattu kertoimella 145, eli ne ovat mittakaavassa 1:145. Koelaitteiston maksimiteho on 2,5 MW, joka vastaa kymmentä prosenttia referenssilaitoksen reaktorin skaalatusta lämpötehosta. Koelaitteisto koostuu ydinreaktorin sydäntä kuvaavista sähkövastuksista, reaktorin paineastiasta, alasmenotilasta, neljästä pääkier-topumpusta ja neljästä pystyhöyrystimestä, sekä näitä komponentteja yhdistävistä putkilinjoista ja apulaitteista.

Luvussa neljä kerrotaan pienen vuodon kokeen PKL III E2.2 vaiheet ja tulokset. Kokeessa vuotopaikka on primääripiirin kylmähaarassa ja sen koko on 0,22 cm². Koelaitteistossa oleva vuoto vastaa referenssilaitoksessa kooltaan 32 cm² olevaa vuotoa. Häätäjäähdytys on käytössä kahdella korkeapainepumpulla ja kahdella matalapainepumpulla kylmähaaroihin yksi ja kaksi. Kylmähaaroihin kolme ja neljä ei syötetä häätäjäähdytysvettä. Koelaitteistoa jäähdytetään kokeen aikana nopeudella 100 K/h.

Viidennessä luvussa kerrotaan kuinka koelaitteisto on mallinnettu Apros-simulointiohjelmalla käyttäen graafista Grades käyttöliittymää. Tätä

mallia tullaan käyttämään VTT:llä ja STUKissa PKL-koelaitteiston termohydraulisten kokeiden mallintamiseen. Tässä luvussa on suoritettu myös Aprosin eri boorikonsentraatioiden laskentamethodien vertailua mallintamalla erikseen koelaitteiston yksi vesilukko ja kylmähaara.

Kun koelaitteisto oli mallinnettu Aprosimulointiohjelmalla, suoritettiin simulointimallilla

pienen vuodon koe. Simulointimallilla laskettuja tuloksia verrattiin koelaitteistolla suoritettuun pienen vuodon kokeeseen ja näin saatiin selville kuinka tarkasti laskentatulokset vastaavat koelaitteistosta mitattuja arvoja. Kokeen tulokset ja mallin saattaminen kokeen alkutilaan on esitetty luvussa kuusi.

2 Boori ydinvoimalaitoksessa

2.1 Ydinreaktorin reaktiivisuuden hallinta

Reaktiivisuuden säätöjärjestelmää tarvitaan pitämään reaktori halutulla tehotasolla kriittisenä tai tarvittaessa sammutettuna. Tavallisimpia reaktiivisuuden säätömenetelmiä ovat liikkuva absorbaattori (säätösauva), liukeneva myrkky, palava myrkky, moderaattorin eli hidasteen pinnankorkeus, liikkuva polttoaine-elementti, spektrisäätö ja heijastinsäätö [2]. Eri säätömenetelmiä käytetään eripituisilla aikaväleillä tapahtuvaan reaktiivisuuden säätöön eli näiden menetelmien aikavakiot ovat eri suuria. Tästä johtuen samassa reaktorissa käytetään useita eri säätömenetelmiä.

Yleisin reaktiivisuuden säätömenetelmä on liikkuvien absorbaattoreiden eli säätösauvojen käyttö. Säätösauvoja käytetään varsinkin reaktorin lyhyen aikavälin nopeaan säätöön. Säätösauvalla tapahtuva säätö perustuu siihen, että sauva absorboi voimakkaasti neutroneja. Sauvaa liikutetaan reaktorissa aksiaalisuunnassa ja mitä syvemmällä sauvat ovat, sitä enemmän ne absorboivat neutroneja. Kun sauvoja työnnetään syvemmälle reaktorin sydämeen, niin silloin sauvoihin tapahtuvien neutronikaappausten määrä lisääntyy, fissioiden määrä vähenee ja reaktorin teho alkaa laskea. Vastaavasti vetämällä säätösauvoja ulospäin kaappaukset vähenevät ja fissioiden osuus kasvaa ja reaktorin teho nousee.

Boori kuuluu säätömenetelmissä liukeneva myrkky ryhmään ja sitä käytetään reaktorissa pitkällä aikavälillä tapahtuvien hitaiden reaktiivisuusmuutosten säätöön. Hitaita reaktiivisuusmuutoksia aiheuttavat ksenon- ja samariummyrkytykset ja palama. Reaktiivisuuden säätö tapahtuu muuttamalla veteen liuotetun boorin määrää. Sä-

tösauvoihin verrattuna tällä menetelmällä saadaan aikaiseksi tasaisempi tehojakautuma.

Palavien myrkkujen käyttö perustuu reaktoriin kiinteästi sijoitetun voimakkaan absorbaattorin määrän pienenemiseen palaman kasvaessa.

Moderaattorin pinnankorkeussäädöllä voidaan vaikuttaa reaktiivisuuteen muuttamalla reaktori-sydäimestä tapahtuvaa neutronivuotoa. Tätä reaktiivisuuden säätömenetelmää käytetään erikoisesti paineputkityyppisissä raskasvesireaktoreissa.

Nopeiden reaktoreiden reaktiivisuussäädössä käytetään liikkuvia polttoaine-elementtejä ja joissakin käytetään myös heijastinsäätöä, jolla tarkoitetaan heijastimen muodon tai määrän muuttamisella tehtävää neutronivuodon muuttamiseen perustuvaa reaktiivisuussäätöä.

Kun reaktiivisuutta säädetään muuttamalla neutronien energiaspektriä, on kyseessä spektrisäätö.

Reaktiivisuuden hallitsemiseksi tulee suunnitella kaksi toisistaan riippumatonta, eri periaatteilla toimivaa hallintajärjestelmää, joista kumpikin erikseen pystyy pysäyttämään reaktorin käyttötilanteissa. Ainakin toisen näistä järjestelmistä on yksinään kyettävä pitämään reaktori pysäytettynä kaikissa reaktorin lämpötiloissa. Reaktiivisuuden hallintajärjestelmät tulee suunnitella siten, että ne yksinään tai yhdessä jäähdytteenmenetystilanteiden varalta suunniteltujen järjestelmien lisäämän reaktiivisuusmyrkyksen kanssa kykenevät luotettavasti pitämään reaktorin pysäytettynä oletetuissa onnettomuuksissa. Reaktiivisuuden hallintajärjestelmät on suunniteltava siten, että vakavassa reaktorionnettomuudessa vaurioitunut reaktori tai sen jäänteet pysyvät alikriittisenä. (YVL 1.0 [3]). Yleisimmin nämä toisistaan riippumattomat sää-

töjärjestelmät ovat säätösauvat ja jäähdytteeseen liuotettu myrky, kuten boori.

2.2 Boorin laimenemismekanismit painevesilaitoksessa

Boorin laimenemismekanismit voidaan jakaa ulkoi- siin ja sisäisiin boorin laimenemismekanismiin Tuomiston mukaan [4]. Ulkoisilla laimenemis- mekanismeilla tarkoitetaan tapahtumaa, jolloin primääripiiriin pääsee ulkoapäin joko täysin boori- tonta vettä tai vettä, jossa on hyvin vähän booria. Tällainen tilanne voi syntyä esimerkiksi, jos onnet- tomuustilanteessa syötettävän hätäjäähdytysveden booripitoisuus on syystä tai toisesta liian pieni. Sisäistä boorin laimenemistä taas tapahtuu monien onnettomuuksien yhteydessä, esimerkiksi pienen vuodon aikana, jolloin syntyy kiehutus-lauhdutus- lämmönsiirtotilanne tai höyrystimessä olevasta vuodosta pääsee primääripuolelle takaisinvirtauk- sena sekundääripuolella olevaa booritonta vettä. Tätä primääri- ja sekundääripiirien välillä olevaa vuototapausta kutsutaan PRISE-onnettomuusti- lanteeksi.

Normaalisti painevesireaktorin primääripiiri on täynnä vettä, lukuun ottamatta paineistinta, jossa on höyrypatja. Jos primääripiiriin syntyy vuoto, niin vesimäärä ja paine laskevat. Höyrystimet ovat korkeimmalla, joten ne tyhjäntyvät ensim- mäisinä. Vedenpinnan laskiessa pumput joudutaan pysäyttämään, koska on vaarana, että pumput vaurioituvat niiden ollessa toiminnassa kaksifaasi- virtauksen aikana. Myös jäähdytyskierto pysähtyy, kun pumput pysäytetään. Höyrystimien ollessa osittain tyhjentyneenä, reaktorissa syntynyt höyry lauhtuu höyrystimessä ja riippuen vedenpinnan korkeudesta höyrystimen primääripuolella, lauhde jakaantuu höyrystimen kuuma- ja kylmäkollektori- den kesken. Syntyy kiehutus-lauhdutus-läm- mönsiirtotilanne. Vedessä oleva boori ei liukene höyryyn, vaan se jää reaktoriin ja höyrystimen sisäänmenon puolelle eli kuumakollektoriin, riip- puen millä korkeudella vesi on. Lauhtunut vesi on joko täysin booritonta tai siinä on hyvin vähän booria ja syntyy ns. boorittoman veden tulppa. Jatkossa puhuttaessa boorittoman veden tulppasta

tarkoitetaan sillä vettä, joka on joko booritonta tai siinä on vähän booria. Boorittoman veden tulppasta käytetään puhekielessä myös nimitystä ”puhtaan veden tulppa”.

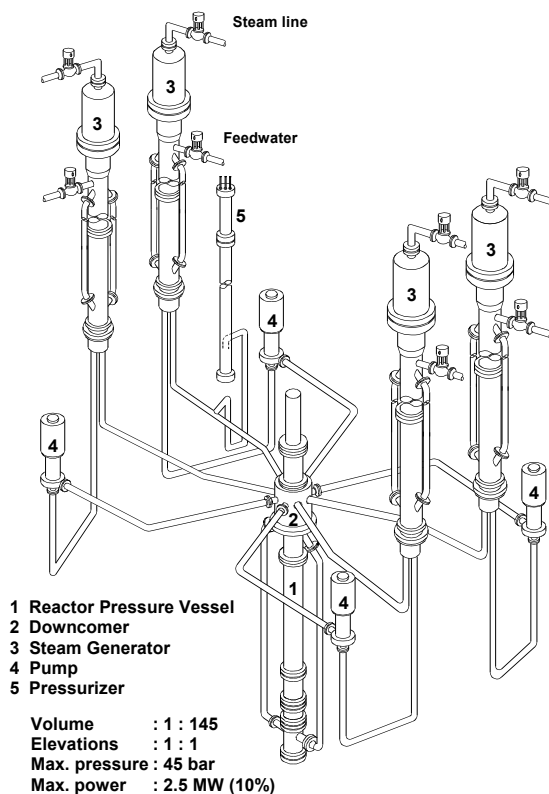
Jo hyvinkin pieni määrä (alle 0,5 m³) booritonta vettä voi aiheuttaa reaktorin sydämessä reaktiivi- suuden nousun, jos tämä boorittoman veden tulppa pääsee kulkeutumaan sydämeen asti sekoittumatta booripitoisempaan veteen. Jos boorittoman veden tulpan ollessa kylmähaarassa käynnistetään vie- lä kiertopumput, niin boorittoman veden tulppa saapuu tällöin sydämeen suuremmalla nopeudella ja reaktiivisuuden nousu on voimakkaampaa kuin boorittoman veden tulpan saapuessa sydämeen luonnonkierron vaikutuksesta. Boorittoman veden tulppa ei kuitenkaan yleensä pääse tulemaan sydämeen täysin puhtaana, vaan se sekoittuu boori- pitoisempaan veteen alaschenotilassa. Pahin tilanne on boorittoman veden tulppien lähtiessä yhtä aikaa useammasta haarasta liikkeelle. Boorittoman veden vaikutus reaktorin reaktiivisuuteen riippuu boori- toman veden määrän lisäksi sen lämpötilasta, siten että mitä kylmempää vesi on, sitä suurempi booripi- toisuus tarvitaan pitämään reaktorin teho vakiona [5]. Attardin mukaan kriittinen booripitoisuus 260 °C:een lämpötilassa on 200 ppm ja 149 °C:een lämpötilassa 550 ppm.

Suomen turvallisuussuunnittelussa on määri- tetty, että polttoaineen jäähdytyksen olennaisen heikkenemisen tai muusta syystä aiheutuvan polt- toaineaurion todennäköisyyden on oltava pieni normaaleissa käyttötilanteissa ja odotettavissa olevissa käyttöhäiriöissä [3].

Yksi keino tutkia booripitoisuuden laimene- mista on käyttää hyväksi tietokonesimulointia. Boorin laimenemiskokeita pystytään tekemään koelaitteistolla, kuten tässä käsiteltävällä PKL- koelaitteistolla. Tekemällä koelaitteistosta tieto- konesimulointimalli ja vertaamalla tällä mallilla saatuja tuloksia koelaitteistolla saatuihin tuloksiin, pystytään päättelemään kuinka luotettavia tietoko- neanalyysit ovat. Todettaessa tietokonesimulaatiot luotettaviksi, niitä voidaan soveltaa myös oikeisiin ydinvoimalaitoksiin.

3 PKL-koelaitteisto

PKL-koelaitteisto kuvaa sähköteholtaan 1300 MW PWR-ydinvoimalaitoksen primääripiiriä ja osaa sekundääripiiristä, lukuun ottamatta turbiinia ja lauhdutinta. Laitteisto koostuu reaktoripaineesta, neljästä pystyhöyrystimestä, pääkiertopumpusta, paineistimesta, hätäjähdytysjärjestelmästä ja mittauslaitteistoista. Reaktoripaineastia jakaa pienempiin osakokonaisuuksiin, joita ovat alatila, sydän, ylätila ja alasmenotila. Laitteisto sijaitsee Saksassa Erlangenissa ja se on rakennettu jo 1970-luvun puolivälissä. Koelaitteiston omistaa Framatome ANP. Laitteiston referenssilaitos on saksalainen Philippsburg 2. Laitteiston korkeus-
suhteet on rakennettu 1:1, mutta tilavuudet ja teho on skaalattu kertoimella 145. Laitteistokokonaisuus



Kuva 1. PKL-koelaitteisto [6].

näky kuvasta 1. Primääripiirin maksimipaine on 45 bar ja sekundääripiirin 56 bar.

Koelaitteisto on rakennettu ydinvoimalaitosten termohydraulisten kokeiden suorittamista varten. 1970-luvun lopulla ja 1980-luvun alkupuoliskolla koelaitteistolla suoritettiin PKL I ja PKL II koeohjelmat, joissa tutkittiin sekä suuren että pienen vuodon tapauksia (LBLOCA, SBLOCA). Näiden kokeiden avulla voitiin edelleen kehittää tietokoneille ja simulointiohjelmiä.

Vuonna 1986 alkoi PKL III koeohjelma, jota jatkettiin taas vuonna 2001 kansainvälisenä SETH-yhteistyöprojektina, jonka aloitti OECD (Organization for Economic Co-operation and Development). Koeohjelmassa tutkitaan erilaisia onnettomuustilanteita ja termohydraulisia ilmiöitä ja nykyään kiinnitetään huomiota varsinkin erilaisiin boorin laimenemismekanismiin [6].

3.1 Reaktorin sydän

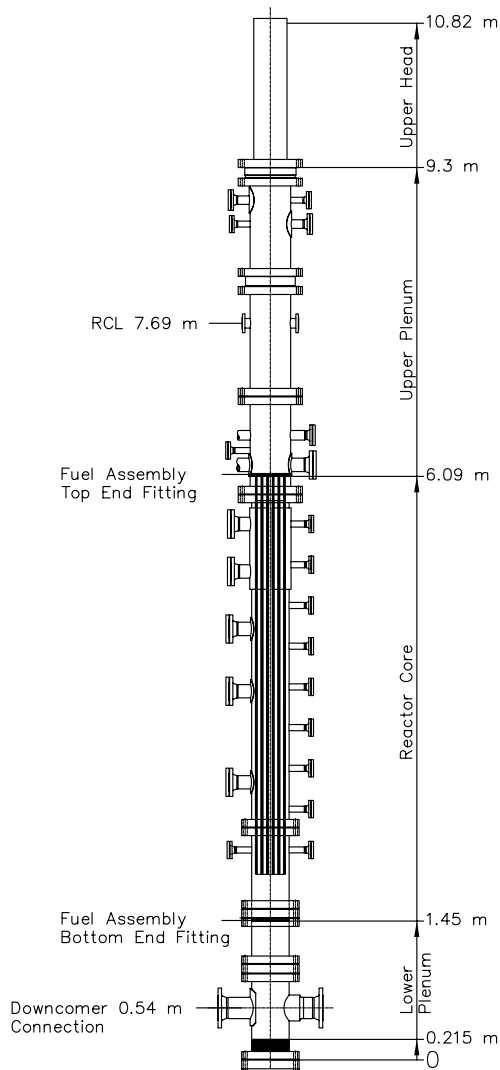
Reaktorin sydämenä (Core) ei ole polttoainesauvoja, vaan sydän on mallinnettu sähkövastuksilla. Sydämen suurin teho on 2,5 MW, joka vastaa 10 % referenssilaitoksen skaalatusta lämpötehosta. Polttoainesauvojen eli näiden sähkövastuksien halkaisija on pidetty samana kuin oikeassakin laitoksessa, vain lukumäärä on vähennetty. Sydän vastaa siis osaa oikean reaktorin sydäimestä. Sähköisesti lämmitettäviä sauvoja on kaikkiaan 314 kappaletta. Sauvat on järjestetty kolmeen saman keskeiseen kehään ja jokaista kehää voidaan lämmittää erikseen. Näin saadaan aikaan erilaisia radiaalisia tehojakautumia. Sauvojen välissä on 26 kappaletta säätösauvoja.

3.2 Ylätila

Ylätilan jakaa kahteen osaan levy, jossa on yhdeksän kappaletta halkaisijaltaan 29,2 mm reikiä. Tämä määrä reikiä aiheuttaa samanlaisen paine-

häviön kuin referenssilaitoksen ylätilassa olevat säätösauvojen säätölaitteet ja muut apulaitteet. Ylätilan yläosa (Upper Head) on sylinterimäinen reaktoripaineastian ylimmäinen osa. Kammiossa on akseli, joka toimii reaktoripaineastian vedenkorkeuden mittauksena. Kammiossa on myös suppilo, joka ohjaa ylhäällä kondensoituvan veden ylätilan alaosaan.

Ylätilan alempi osa (Upper Plenum) on sydämen ja reikälevyn välissä. Korkeus on sama kuin referenssilaitoksessakin, mutta tilavuus on mallinnettu mittakaavassa 1:145, kuten muut koelaitteiston tilavuudet. Keskellä ylätilaa on ylätilan yläosasta tuleva pinnankorkeuden mittausakseli. Kuvassa 2 on reaktoripaineastia, joka koostuu edellä esitellyistä reaktorin sydäimestä, ylätilan kammioista, ylätilasta sekä alatilasta.



Kuva 2. Reaktoripaineastia [6].

3.3 Ylätilan ohitus

Ylätilan ohitus (Upper Head Bypass) on toteutettu neljällä putkella, jotka yhdistävät ylätilan ja alasmienotilan. Ohituksen painehäviö on saatu sopivaksi asettamalla jokaiseen ohituslinjaan laippa, jonka halkaisija on 3,9 mm ja pituus 5 mm. Oikea virtausmäärä ohituksen kautta on 0,5 % kokonaisuusvirtauksesta pääkiertopumppujen käydessä.

3.4 Alasmienotila

Alasmienotilan kammion ylempään osaan (Downcomer vessel) yhdistyvät kylmähaarat. Tämä osa on rengasmaisen tila. Kylmähaarojen yhteet on sijoitettu symmetrisesti alasmienotilan kehälle. Yhteiden välissä on 250 mm korkeat levyt, jotka estävät yhteestä tulevan virtauksen suoran kulkeutumisen toiseen yhteeseen. Virtaus pääsee kuitenkin kulkemaan yhteestä toiseen kiertämällä levyn.

Alasmienotilan kammio on noin 1,6 metriä korkea ja sen alapuolella alasmienotila on jaettu kahteen putkeen, jotta alasmienotilan pinta-alatilavuussuhde saataisiin pysymään oikeana eli samana kuin koelaitteiston referenssilaitoksessakin on. Putkien hydraulinen halkaisija on sama kuin oikean laitoksen rengasmaisen osan hydraulinen halkaisija. Alhaalla putket yhdistyvät reaktorin alatilasta, kuten kuvassa 3 näkyy.

3.5 Reaktorin pääkiertopiirit

Pääkiertopiirit yhdistävät reaktorin, höyrystimet ja pääkiertopumput toisiinsa. Kuumahaara yhdistää reaktorin ja höyrystimen, höyrystimen ja pääkiertopumpun välissä on vesilukko ja pääkiertopumpun ja reaktorin yhdistää kylmähaara. Putket ovat pääasiassa sisähalkaisijaltaan 80,8 mm, mutta kuumahaarassa halkaisija on kasvatettu 128,8 mm:iin, jotta pystytään paremmin tutkimaan kaksifaasivirtauksia. Häätäjäähdytysveden syöttösuuttimet sijaitsevat kylmähaaroissa. Kylmähaaroissa yksi ja kaksi sijaitsevat myös vuotokohtat. Myös kuumahaaroissa on häätäjäähdytysveden syöttösuuttimet, mutta niitä ei käytetä tässä kokeessa.

3.6 Pääkiertopumput

Reaktorin pääkiertopumput ovat keskipakois-pumppuja ja niiden toiminta-arvot selviävät alla. Pysähdyksissä olevan pumpun painehäviötä sääde-

tään pumpun edellä olevalla läppäventtiilillä. Kun pumppu on pysähdyksissä, niin venttiili on kiinni. Kiinni olevan venttiilin virtausala on 20 % auki olevasta venttiilistä.

- Tuotto 120 m³/h
- nostokorkeus 90 m
- NPSH 3 m
- suunnittelupaine 50 bar
- suunnittelulämpötila 250 °C
- toimintapaine 45 bar
- nopeus 2950 rpm
- moottorin min. teho 42 kW.

3.7 Höyrystimet

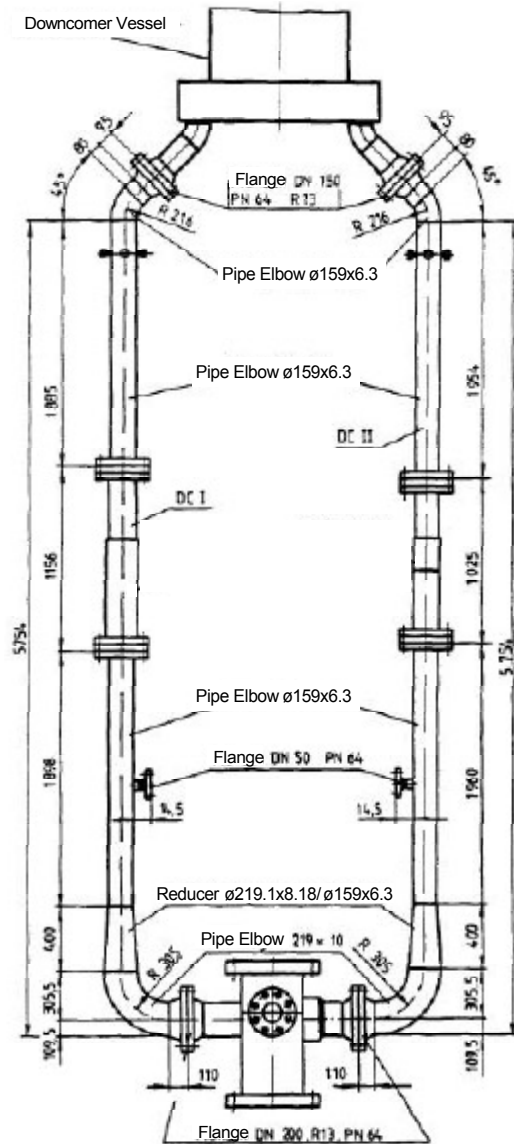
Höyrystimiä on neljä kappaletta ja ne ovat u-putki pystyhöyrystimiä. Putkia on yhdessä höyrystimessä 28 kappaletta, niitä on seitsemää eri pituutta ja ne on hitsattu kiinni putkilevyyn. Pisin ja lyhin putki ovat yhtä pitkiä kuin referenssilaitoksessakin. Höyrystimen lämmönsiirtopinta-ala on mitoitettu 1:145 mittakaavaan. Putkilevyn alapuolella on sisäänmeno- ja ulostulokammiot eli kuuma- ja kylmäkolektorit. Kuuma- ja kylmäkolektoreita on vielä laajennettu alaspäin tulevilla putkilla.

Höyrystimen sekundaaripuolelta voidaan erottaa seuraavat tilat, alasmenotila, ylösnousukanava ja höyrykammio. Alasmenotila on jaettu kolmeen osaan. Ylin ja alin osa ovat rengasmaisia tiloja ja keskimäinen osa on jaettu kahteen putkeen, kuten reaktoripaineastiassakin. Ylösnousukanava on u-putkien ympärillä oleva tila, jossa sekundaaripuolen vesi lämpenee ja nousee ylöspäin. Ylimpänä höyrystimessä on höyrykammio, josta höyry johdetaan ulos.

3.8 Paineistin

Paineistin on sylinterimäinen paineastia, jolla säädetään primääripiirin painetta. Paineen säätö tapahtuu lämmittämällä vettä sähkövastuksilla

tai lauhduttamalla höyryä ruiskuttamalla vettä paineistimeen. Paineistimen korkeus on 13,3 m, ulkohalkaisija 250 mm ja tilavuus 0,502 m³. Paineistin on yhdistetty kuumahaaraan kaksi paineistinlinjalla.



Kuva 3. Alasmenoputket [6].

4 Pienen vuodon koe

Ydinreaktorin jäähdytteenmenetyssonnettomuuden (LOCA) aiheuttaa vuoto primääripiirissä. Vuodon on oltava sen verran suuri, että lisävettä ei pystytä syöttämään tarpeeksi korvaamaan vuotavan veden määrä. Vuoto voi olla primääripiirin putkistossa tai höyrystimen putkissa. Primääripiirin paineen alenemisen voi aiheuttaa myös paineistimen paineenalennusventtiilin vikaantuminen.

Ydinreaktorin primääripiirissä olevat vuodot jaetaan vuodon halkaisijan perusteella seuraavasti [7]:

- pieni vuoto 10–80 mm.
- keskikokoinen 80–250 mm
- suuri yli 250 mm.

Lisäksi, jos vuodon halkaisija on alle kymmenen millimetriä, sanotaan sitä erikoisen pieneksi vuodoksi. Näin pieniä vuotoja voi olla esimerkiksi venttiileissä, eivätkä ne erityisemmin haittaa laitoksen toimintaa. Pienen ja keskikokoisen vuodon ero on se, että keskikokoinen vuoto on tarpeeksi suuri siirtämään pois primääripiiristä reaktorin jälkilämpötehon eli keskikokoinen vuoto aiheuttaa tarpeeksi suuren paineen alenemisen primääripiiriin. Pienen vuodon tapauksessa tarvitaan jokin järjestelmä siirtämään jälkilämpöteho pois primääripiiristä. Yleisimmin tämä tapahtuu alentamalla höyrystimien painetta.

Havaittaessa pieni vuoto primääripiirissä aletaan hätäjäähdytysvettä syöttää yleensä jo 20–60 sekunnin kuluessa, pääkiertopumput pysäytetään ja reaktori menee pikasulkuun. Vuoto havaitaan primääripiirin paineen laskemisena tai paineistimen pinnan alenemisena. Reaktoria jäähdytetään luonnonkierrolla, koska pumput on pysäytetty. Aluksi jäähdytys tapahtuu yksifaasiluonnonkierrota vedellä, mutta paineen laskiessa ja primääripiirin vesimäärän pienentyessä vesi alkaa kiehua reaktorin sydämessä. Sydämessä syntyvä höyry lauhtuu höyrystimissä. Näin reaktoripiirissä alkaa

kiehutus-lauhdutus lämmönsiirtotilanne. PKL III E2.2 kokeessa on tarkasteltu tällaista pienen vuodon jälkeistä tilannetta.

4.1 Kokeen tavoite ja koejärjestely

Kokeen päätavoitteena on tarkastella kuinka pieneksi booripitoisuus laskee reaktoripaineastian sisääntulossa pienen vuodon tapauksessa. Kun primääripiiriin tulee vuoto, primääripiirin paine laskee ja vesi höyrystyy reaktorin yläosassa. Tässä kokeessa vuoto on ensimmäisen pääkiertopiirin kylmähaarassa. Lämpö siirtyy sekundääripuolelle kiehutus-lauhdutus lämmönsiirrolla eli sydämessä syntynyt höyry lauhtuu höyrystimessä ja luovuttaa näin lämpöenergiaa faasin muutoksessa. Koska boori ei kulkeudu vesihöyryn mukana kuin hyvin pienin määrin, se jää reaktoriin. Höyryn lauhtuessa vesilukkoon kertyy joko booritonta vettä tai vettä, jossa on hyvin vähän booria. Luonnonkierroksen lähtiessä liikkeelle (pumput pysähdyksissä), lähtee myös vesilukkoon kertynyt boorittoman veden tulppa liikkeelle. Boorittoman veden tulpan saapuessa reaktoriin, nousee teho huomattavasti ja seurauksena voi olla jopa polttoainesauvojen vaurioituminen. Koelaitteistossa tehon nousua ei kuitenkaan havaita, koska polttoainesauvojen tilalla on sähkövastukset.

Boorittoman veden tulpan reaktoriin saapumisen vakavuus riippuu siitä, kuinka suuri määrä booritonta vettä on ja miten hyvin se on sekoittunut booripitoiseen veteen ja siitä kuinka suuri aikaero on eri piireissä muodostuneiden boorittoman veden tulppien saapumisella reaktoriin. Jos boorittoman veden tulpat saapuisivat kaikista piireistä yhtä aikaa, olisi sydämeen joutuva boorittoman veden määrä suurempi kuin, jos ne saapuvat eri aikaan.

Tässä kokeessa boorittoman veden määrä on pyritty saamaan mahdollisimman suureksi, suuremmaksi kuin sen on ennustettu muodostuvan eri tietokonemalleilla tarkasteltaessa. Boorittoman,

kondensoituneen veden määrä saadaan mahdollisimman suureksi, kun kylmähaaraan syötetään hätäjähdytysvettä ja kun vuodon koko on sopivan suuri aiheuttamaan mahdollisimman pitkän kiehumus-lauhdutus lämmönsiirtovaiheen.

Yhteen kootusti kokeessa oli tarkoitus selvittää seuraavat asiat:

- boorittoman veden määrä, joka muodostuu vesilukkoon
- höyrystimen sekä kylmä- että kuumahaaran aiheuttama sekoittuminen
- luonnonkierron aiheuttama boorittoman veden kuljetustehokkuus reaktoriin
- luonnonkierron alkuaikojen minimi booripitoisuus reaktoripaineastian sisäänmenossa
- eri haaroista tulevien boorittoman veden tulppien reaktoriin saapumisaikaero.

Pieni vuoto on kooltaan $0,22 \text{ cm}^2$ ja se on ensimmäisessä kylmähaarassa pumpun ja reaktoripaineastian välissä. Tämä vuoto vastaa referenssilaitoksessa kooltaan 32 cm^2 olevaa vuotoa. Höyrystimiä jäähdytetään nopeudella 100 K/h . Ensimmäiseen ja toiseen kylmähaaraan syötetään vettä korkeapainepumpuilla. Samoihin haaroihin syötetään vettä myös matalapainepumpuilla paineen pudottua alle kymmeneen bar [8].

4.2 Kokeen alkutilan saavuttaminen

Ennen kokeen alkua koelaitteisto, lukuun ottamatta paineistinta, oli täytetty aivan täyteen vettä, jonka booripitoisuus oli kauttaaltaan 1000 ppm . Paineistimen vedenkorkeus oli $0,5 \text{ m}$ ja primääripiirin kokonaisvesimäärä 2300 kg . Reaktorin sydämen teho oli 530 kW ja paine 42 bar , veden lämpötila sydämen yläpuolella oli 250 °C . Sekundääripiirin höyryn paine oli 28 bar .

Kokeen alkutilan saavuttamisen ensimmäisessä vaiheessa pienennettiin primääri- ja sekundääripiirien lämpötilaeroa sulkemalla höyrystimen höyrylinja. Kun nyt sekundääripiirin lämpötila ja paine nousivat, niin nousi myös reaktoriin menevän veden lämpötila. Koska reaktorin lämpötila nousi, alkoi vesi höyrystyä ja höyrystymisen seurauksena nousi myös paineistimen pinnankorkeus ja paine. Eristysajankohta oli $t = -6450 \text{ s}$.

Toisessa vaiheessa ajanhetkellä $t = -5270 \text{ s}$, reaktorin paine oli 44 bar ja vuotokohta aukaistiin. Reaktorin paine lähti laskemaan ja se laski $1-2 \text{ bar}$ sekundääripuolen paineen yläpuolelle. Reaktorin

ylätila tyhjentyi ja veden pinta laskeutui kuumahaarojen tasolle. Myös höyrystimet ja paineistin tyhjentyivät. Ajasta $t = -4430 \text{ s}$ eteenpäin, aina kokeen alkuun asti, paine pidettiin noin 40 bar . Kun pinnan taso höyrystimen ulostulossa laskeutui pysyvästi putkilevyn alle, suljettiin vuoto ($t = -3950 \text{ s}$). Vettä jäi piiriin noin $1170-1180 \text{ kg}$.

Kolmannessa vaiheessa, mikä kesti 3240 s , kehitettiin kondensoitunut vesi vesilukkoon. Vesilukkojen booripitoisuus oli lopulta alle 50 ppm . Myös kuumahaaran booripitoisuus putosi, mutta se ei laskenut alle 400 ppm . Kolmannessa vaiheessa kondensoitunutta vettä syntyi noin 200 kg . Tämän veden oletettiin jakautuneen tasan kylmä- ja kuumahaaran kesken. Kondensoituneen veden massa saatiin laskettua sekundääripuolen energiataseesta.

Neljännessä vaiheessa ajanhetkellä $t = -710 \text{ s}$ aloitettiin hätäjähdytysveden syöttäminen pienellä massavirralla korkeapainepumpuilla kylmähaaroihin yksi ja kaksi. Pientä hätäjähdytysveden virtausta käytettiin suurien paine-erojen estämiseksi. Jos hätäjähdytysveden massavirta olisi ollut suurempi, olisi voinut syntyä suuria vesimassojen liikkeitä, mikä taas olisi johtanut korkea- ja matalabooripitoisten vesimassojen sekoittumiseen. Hätäjähdytysveden booripitoisuus oli 2200 ppm . Neljättä vaihetta jatkettiin aina ajanhetkeen 0 s saakka, joka oli kokeen alkuaikojen hetki. Kokeen alkuun mennessä primääripiirin vesimäärä oli noussut noin 1440 kg :aan.

4.3 Kokeen eteneminen

Kokeen alkutilanteessa koelaitteiston pinnankorkeus oli laskenut kuuma- ja kylmähaarojen korkeudelle, joten kaikki höyrystimet poistivat lämpöä kiehumus-lauhdutus lämmönsiirrolla. Vesilukkojen booripitoisuus oli alle 50 ppm ja reaktorin yläosan booripitoisuus oli noin 3600 ppm .

Koe aloitettiin aukaisemalla vuoto kylmähaarassa (veden massavirta vuodosta alussa n. $1,1 \text{ kg/s}$), aloittamalla primääripiirin jäähdytys jäähdytysnopeudella 100 K/h ja pienentämällä reaktorin tehoa 530 :stä 335 :een kW seuraavan yhtälön mukaan [8]. Kuitenkin ensimmäiset 70 sekuntia reaktorin teho pidettiin vakiona 530 :ssä kW .

$$P = 1,06 \cdot 10^6 / (3,63 \cdot 10^3 + t) + 2,46 \cdot 10^2 \quad (1)$$

jossa P on sydämen teho ja t on aika, joka on kulunut kokeen alusta.

Hätäjäähdytysveden syöttöä lisättiin. Alussa reaktorin pinnankorkeus oli haarojen yläreunojen tasolla. Veden määrä primääripiirissä kokeen alussa väheni huolimatta siitä, että hätäjäähdytysvettä syötettiin. Aikavälillä 800–1500 s vesimäärä saavutti miniminsä. Ajanhetkellä $t = 2780$ s paine laski kymmeneen bariin, jolloin hätäjäähdytysvettä alettiin syöttää kylmähaaroihin yksi ja kaksi myös matalapainepumpuilla. Myös matalapainehätäjäähdytysveden booripitoisuus oli 2200 ppm. Matalapainepumput suljettiin paineen noustua takaisin kymmeneen bar. Korkeapainepumput suljettiin ajanhetkellä 5980 s, vuodon massavirran ja hätäjäähdytysveden massavirran asetuttua suunnilleen yhtä suuriksi. Koe lopetettiin ajanhetkellä $t = 8430$ s.

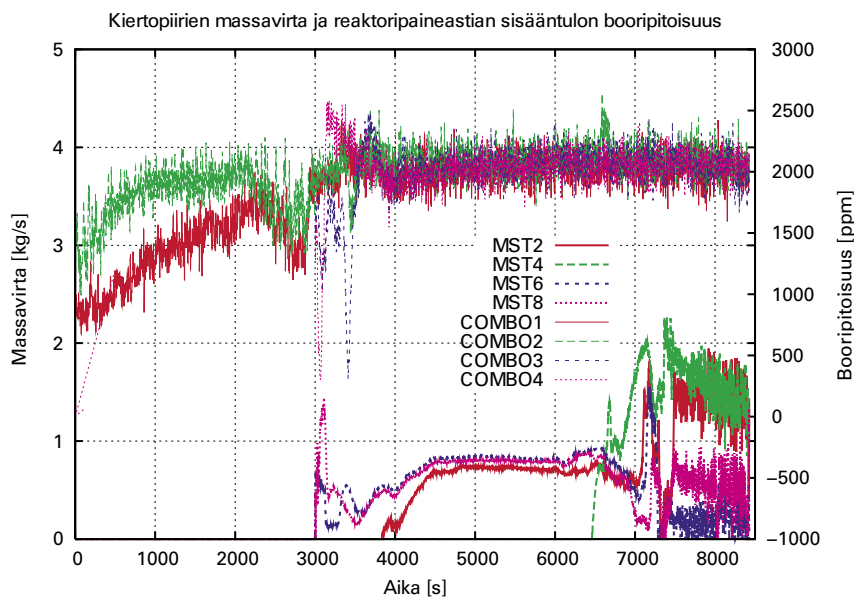
4.4 Tulokset

Booripitoisempi vesi alkaa virrata kuumahaaran puolelta kylmähaaraan höyrystimen u-putkissa veden pinnantason kylmähaarassa saavutettua höyrystimen putkilevyn. Tämä johtuu siitä, että jos pinnan korkeus on matalammalla kuin putkilevy, niin eri putkissa virtaava höyry pääsee sekoittumaan höyrystimen ulostulokammiossa ja näin kaikkien putkien sisäänmenon paineet tasoittuvat samaksi. Sisäänmenon putkien paineiden ollessa yhtä suuret, ovat myös niiden veden pinnankorkeudetkin yhtä suuret.

Pinnankorkeuden saavuttaessa kylmähaaran puolella putkilevyn, ulostulokammiossa ei enää

pääse tapahtumaan höyryn sekoittumista, koska kammio on täynnä vettä. U-putkissa lauhtuva vesi saattaa kertyä joihinkin putkiin ja näin putkien välille alkaa muodostua paine-eroa ja pinnankorkeudet putkissa ovat eri suuret. Veden pinnankorkeuden noustessa höyrystimen u-putken mutkaan, lähtee vesi virtaamaan voimakkaasti kylmähaaran puolelle. Tällöin massavirta kasvaa ja reaktorissa muodostunut höyrykin lähtee voimakkaasti liikkeelle. Jos höyry kerääntyy putken mutkan korkeimpaan kohtaan, massavirta romahtaa. Höyrystimen kuumahaaran puolella oleva vesi on paljon booripitoisempaa kuin vesilukossa oleva, joten veden lähtiessä virtaamaan vesilukon booripitoisuus kasvaa. Kaksifaasivirtaus reaktorista höyrystimeen sekoittaa reaktorissa olevaa voimakkaasti booripitoista vettä laimeampaan kuumahaarassa olevaan veteen. Vähän ennen luonnonkierron alkua booripitoisuus oli alle 100 ppm vain vesilukoissa ja osassa höyrystimien ulostuloista.

Luonnonkierto alkoi ensimmäiseksi piireissä, joihin ei syötetty hätäjäähdytysvettä, kuten kuvasta 4 selviää. Luonnonkierron alussa reaktoriin saapui boorittoman veden tulpat vain piireistä kolme ja neljä. Tästä seurasi booripitoisuuden väliaikainen aleneminen 350 ± 100 ppm:ään reaktoripaineastian sisäänmenossa. Näin ollen reaktoripaineastiaan ei päässyt täysin booritonta vettä missään vaiheessa koetta, vaikkakin boorittoman veden tulpan koko kokeessa oli selvästi ylimitoitettu. Boorittoman veden tulpat saapuivat reaktoriin piireistä kolme ja



Kuva 4. Kiertopiirien massavirta ja booripitoisuus kokeessa [8].

neljä noin 350 sekunnin aikaerolla. Kylmähaaraan kaksi muodostunut boorittoman veden tulppa siirtyi vesilukossa höyrystimeen päin haaraan syötetyn hätäjähdytysveden vaikutuksesta. Siksi tästä piiristä tuleva boorittoman veden tulppa saapui reaktoriin huomattavasti myöhemmin ja sekoittui booripitoisempaan veteen kylmähaarassa ja reaktoripaineastian sisäänmenossa ei ollut mitattavaa booripitoisuuden alenemista luonnonkierron alkaessa. Kylmähaaraan yksi muodostunut boorittoman veden tulppa poistui haarassa olevasta vuodosta.

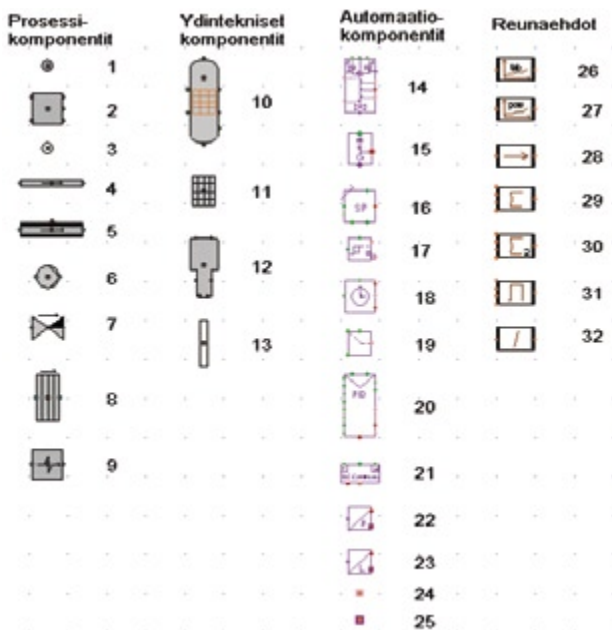
Yhteenvetona voi todeta, että kuumahaarassa oleva vesi sekoittuu reaktorissa ja reaktorin ylätilassa olevaan booripitoisempaan veteen kaksifaasivirtauksen johdosta ja että veden pinnankorkeuden ollessa kylmähaarassa höyrystimen putkilevyn yläpuolella pääsee booripitoisempi vesi virtaamaan sisäänmenosta ulostuloon ja vesilukon booripitoisuus kasvaa. Näin suurin mahdollinen boorittoman veden tulpan koko on vesilukon ja osan höyrystimen ulostulokammioista yhteenlaskettu tilavuus [8].

5 PKL-koelaitteiston mallintaminen Apros-simulointiohjelmalla

Koelaitteiston mallintamisessa on käytetty Apros Grades 5.05 -simulointiohjelmaa. Mallista tuli laaja, se sisältää 852 noodia eli laskentatilavuutta ja lämpörakennenoodeja on 2507 kappaletta.

5.1 Mallinnuksessa käytetyt komponentit

Mallissa on käytetty prosessi- automaatio- ja ydinteknisiä komponentteja sekä reunaehtoja [9]. Prosessikomponenteilla muodostetaan koko mallin perusta, eli niillä mallinnetaan mm. putket, erilaiset kammiot, pumput ja venttiilit. Ydinteknisillä komponenteilla mallinnetaan mm. reaktoripaineastia vaikka laskuissa ei oteta huomioon neutroniikkaa.



Kuva 5. Simulointimallissa käytettyjen komponenttien symbolit Apros Grades -käyttöliittymässä.

Automaatiokomponenteilla tehdään mm. pumppujen ja venttiilien säätöjärjestelmät. Reunaehtojakin käytetään säätöjärjestelmissä, mutta niillä säätö tapahtuu itsenäisesti eli haluttuja arvoja syötetään jonkin komponentin attribuutille esimerkiksi taulukosta. Mallin rakentamisessa käytetyt komponentit on esitetty kuvassa 5.

5.1.1 Prosessikomponentit

1. Pisteellä voidaan yhdistää putket ja se laskee paineen ja lämpötilan.
2. Noodi on tilavuus, jolle annetaan tilavuus ja leveys.
3. Laskentatason symboli, joka voidaan liittää noodiin ja sen avulla saadaan tämän noodin prosessiarvot laskentatasolta.
4. Virtaushaara ja 5. putki lämpörakenteella. Näiden komponenttien ero on se, että putken lämpörakenteella voi jakaa virtaussuunnassa useampaan noodiin ja sillä on seinämät. Virtaushaaraa ei voi jakaa noodeihin, eikä sillä ole seinämiä.
6. Pumpulle annetaan nostokorkeus ja virtausmäärä.
7. Venttiilillä voidaan kuristaa virtausta, tälle komponentille määritellään virtausala ja pituus
8. Lämpörakenteella voidaan luoda esimerkiksi noodi-komponentille seinämät halutusta materiaalista.
9. Lämmönsiirto-komponentti laskee lämmönsiirron lämpörakenteen ja pisteen välillä.

5.1.2 Ydintekniset komponentit

10. Reaktorisydän-komponentti on tehty kuvaamaan oikean ydinvoimalaitoksen reaktoria, tällä komponentilla on kuitenkin paras kuvata myös koelaitteiston reaktori.

11. Reaktorin lämpörakenne, tällä kuvataan reaktorin sydämenä toimivat sähkövastukset.
12. Pystyhöyrystin-komponentti kuvaa höyrystintä. Höyrystinkomponenttiin annetaan kaikki höyrystimen virtauskanavien mitat. Höyrystinputket voidaan jakaa enimmillään viiteen ryhmään.
13. Cladding-rod-komponentti näyttää mm. reaktorin sydämen maksimilämpötilat ja sillä voidaan laskea sydämen oksidoitumista.

5.1.3 Automaatiokomponentit

14. ja 15. Toimilaite yhdistää säätö- ja logiikkamoduulit prosessikomponentteihin.
16. Tällä komponentilla annetaan säätöelimelle asetusarvo.
17. Limit value checker -komponentti toimii binäärilogiikalla siten, että komponenttiin asetetaan arvo, jonka ylittyessä komponentti saa arvon tosi ja asetusarvon alittuessa komponentti saa arvon epätosi.
18. Ajastin mittaa kulunutta aikaa ja antaa joko mitatun ajan tai ajan, joka on jäljellä asetettuun maksimiaikaan.
19. Binäärikytkin valitsee toisen kahdesta signaalista riippuen käyttäjän asetuksista.
20. PID-säädin laskee tarvittavan säätöarvon, joka välitetään laiteohjaimelle.
21. Laiteohjain ohjaa laitteen toimintaa halutulla tavalla. Laiteohjain saa tarvittavat ohjaustiedot säätimiltä ja välittää ne säädettävälle komponentille.
22. Paineenmittaus- ja 23. pinnankorkeusmittauskomponentti.
24. Binäärisignaali välittää binäärisignaalin ja 25. analogiasignaali analogisen signaalin.

5.1.4 Reunaehdot

26. Taulukolla voidaan ohjata eri komponenttien toimintaa jonkun tietyn parametrin funktiona. Yleisesti taulukkoa käytetään, kun jonkun komponentin toimintaa pitää ohjata esimerkiksi ajan funktiona.
27. Tällä komponentilla funktio voidaan kertoa ja/tai korottaa haluttuun potenssiin.
28. No function siirtää muuttujan arvon komponentista toiseen

29. ja 30. Summaimilla voidaan laskea arvoja yhteen, erona näillä on se, että komponentille 30. voidaan myös antaa vakiokerroin ja eksponentti.
31. Tulo-komponentilla voidaan kertoa eri komponenttien attribuutteja.
32. Integraatio-komponentti integroi ajan funktiona sille annettua attribuuttia.

5.2 Laskentaverkot

Apros-simulointiohjelmalla tehtävä malli voidaan jakaa usealle laskentaverkolle tekemällä tietystä komponentista kopio ja liittämällä se toiselle laskentaverkolle ”create slave copy” toiminnolla. Laskentaverkot ovat Apros Grades käyttöliittymän sivuja, joiden avulla esimerkiksi laitteiston säätösystemit voidaan mallintaa eri sivulle ja näin selkeyttää mallia. Apros-simulointiohjelmassa koelaitteisto on jaettu kahdeksalle eri laskentaverkolle. Laskentaverkot ovat reaktorin sydän, jossa on myös reaktorin alatila ja osa ylätilasta, ylätila, alasmenotila, paineistin ja jokainen pääkiertopiiri on omalla laskentaverkollaan. Lisäksi höyrystimien pinnankorkeuden mittaukset on kuvattu omalle laskentaverkolleen.

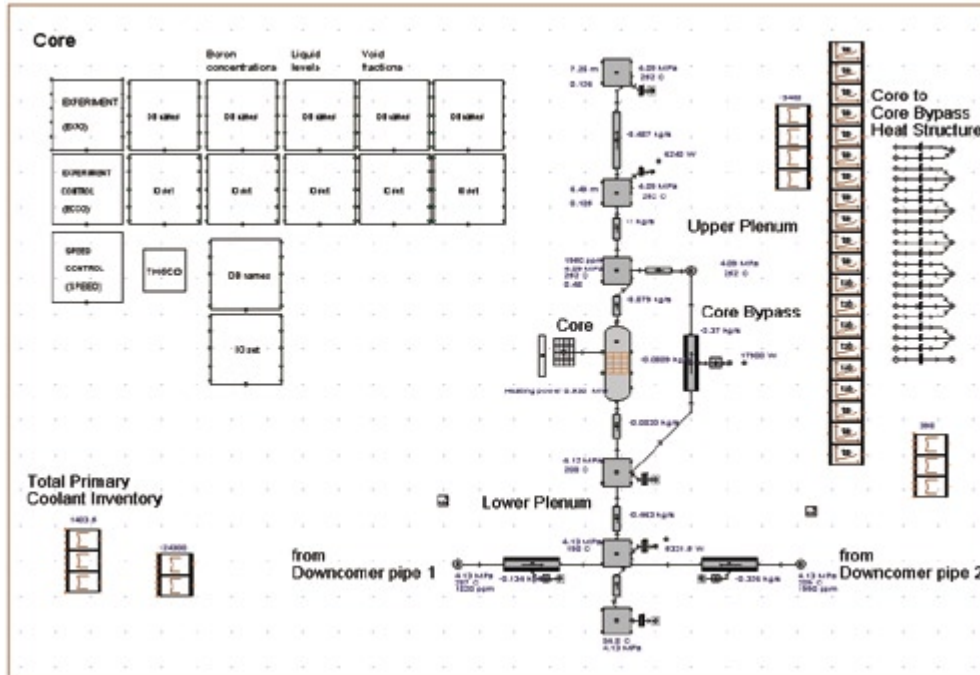
5.2.1 Reaktorin sydän

Reaktorin alatila on jaettu kolmeen noodiin. Alin noodi kuvaa alasmenoputkien yhteiden alapuolista tilaa. Tässä tilassa ei tapahdu suuria virtauksia, vaan vesi pysyy lähes paikallaan. Toiseksi alimpaan noodiin tulee alasmenoputket. Alatilan yläosa yhdistyy reaktorin sydämeen ja sydämen ohitukseen. Reaktorisydän on jaettu 21 noodiin korkeussuunnassa. Sydämen polttoainesauvat eli tässä tapauksessa sähkövastukset mallinnetaan reaktorin lämpörakenne komponentilla. Sydämen ohitusta ei ole mahdollista mallintaa reaktorisydän komponentilla, joten se on tehty erillisellä putki komponentilla. Putken virtauspoikkipinta-ala on sovitettu vastaamaan ohituksen pinta-alaa. Kuvassa 6 on Apros Grades käyttöliittymän näkymä Reaktorin sydän (core) laskentaverkosta. Tällä laskentaverkolla on myös erilaiset simuloinnin ohjaimet ja prosessiarvojen tulostukseen tarvittavat ohjaimet. Näillä ohjataan mm. aika-askeleen pituutta ja iterointien määrää.

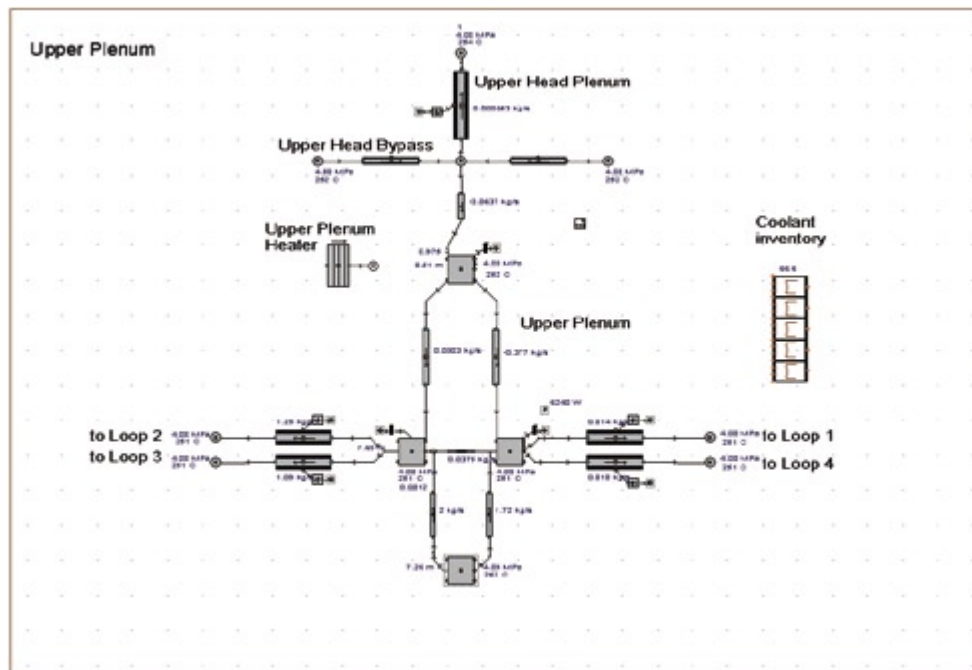
5.2.2 Reaktorin ylätila

Reaktorin ylätila (Upper Plenum, Upper Head) alkaa jo kuvassa 6 olevan Core-komponentin yläpuolelta ja jatkuu kuvaan 7. Kuvassa 7 näkyvä alin noodi on sama kuin kuvan 6 ylimmäinen noodi. Reaktorin ylätilasta lähtevät kuumahaarat höyrystimille. Tila, josta nämä kuumahaarat lähtevät, on jaettu kahteen noodiin. Reaktoripaineastian ylimmäinen osa eli Upper Head on mallinnettu putki-komponentilla. Putken voi jakaa useampaan

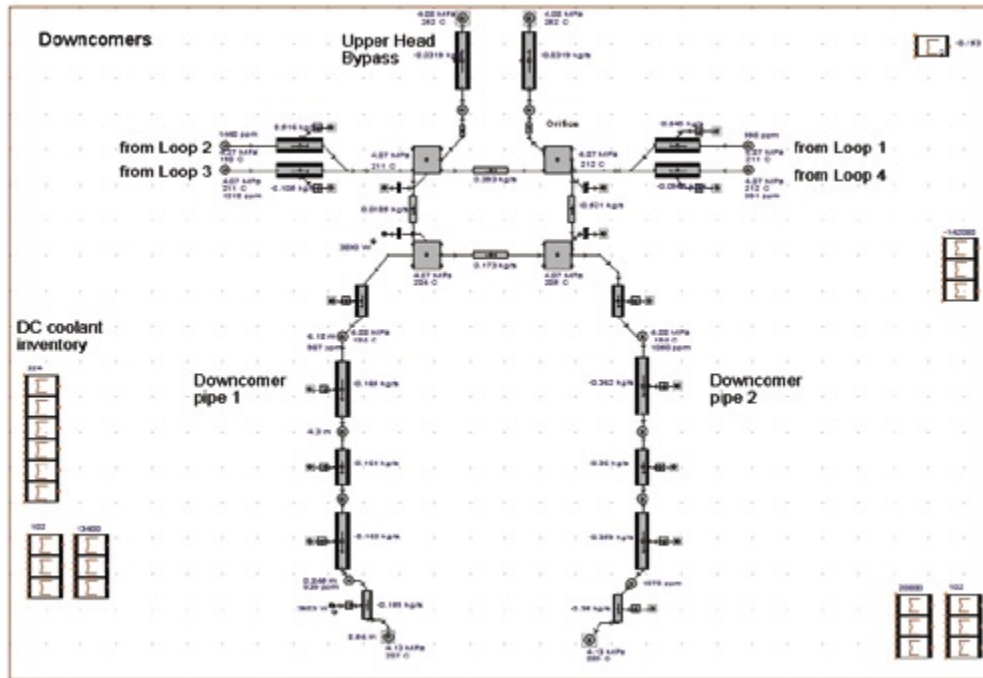
noodiin ja näin pystytään paremmin mallintamaan lämpötilan, veden ja höyryn kerrostumista. Jakamalla ylätila useampaan noodiin vältetään kylmän veden aiheuttamaa höyryn liiallista lauhtumista ja näin reaktorin liian nopeaa täyttymistä. Koelaitteiston ylätilassa on lämmitin kompensoimassa laitteiston lämpöhäviöitä. Malliin on lisätty lämpörakenne (Upper Plenum Heater) kuvaamaan tätä lämmitintä.



Kuva 6. Reaktorin alatila, sydän ja osa ylätilasta.



Kuva 7. Reaktorin ylätila.

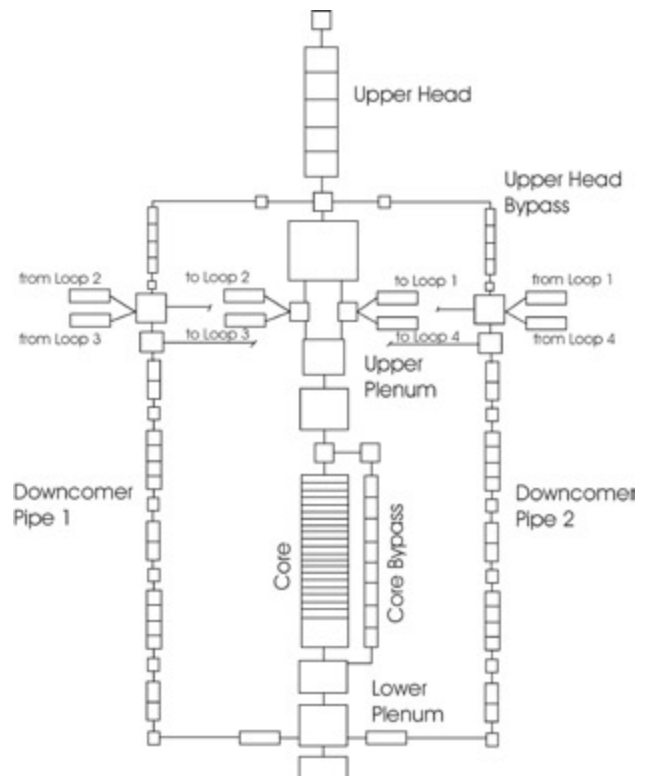


Kuva 8. Alasmenotila.

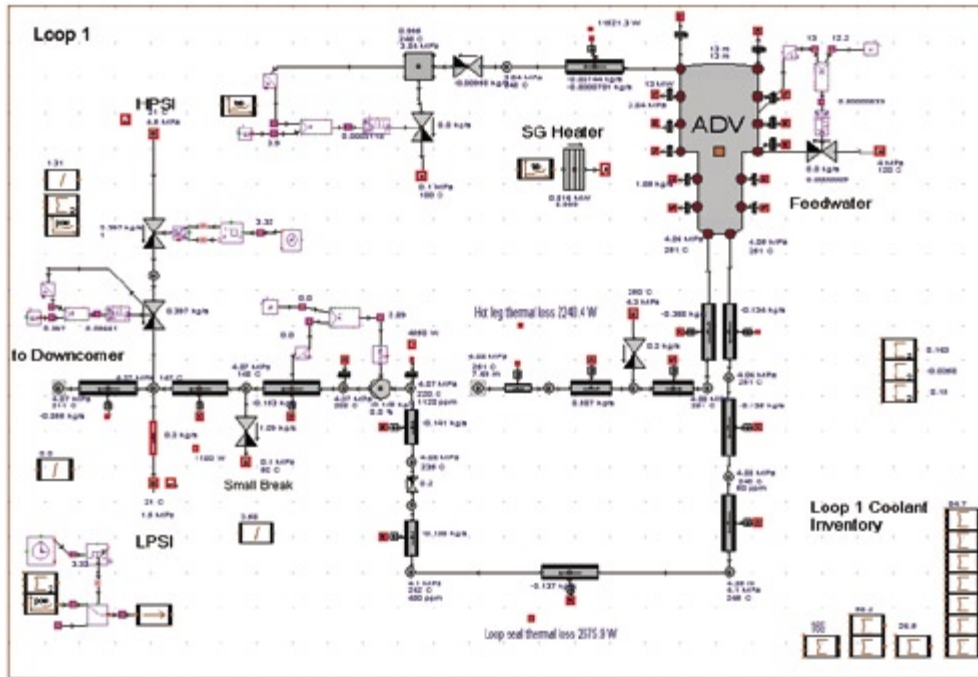
5.2.3 Alasmenotila

Alasmenotilan kammio on jaettu neljään noodiin. Ylemmät kaksi noodia vastaavat puolikkaita tiloja kammion rengasmaisesta osasta. Alemmat kaksi noodia ovat tilat, joista putket lähtevät. Vierekkäisten nooidien välissä olevat virtaushaarat (branchit) kuvaavat sitä, että virtaus pääsee sekoittumaan sivusuunnassa. Näiden putkien vastuskertoimet ovat suuret (form loss coefficient 100), jotta liiallisia kiertovirtauksia ei pääsisi syntymään. Molemmat alasmenoputket on tehty viidestä putkikomponentista ja alasmenoputket ovat keskenään identtiset. Kammion jakamisella neljään noodiin on pyritty kuvaamaan kammiossa tapahtuva sekoittuminen mahdollisimman tarkasti. Yksiulotteisella ohjelmalla ei kuitenkaan pystytä kuvaamaan virtauksien jakautumista ja sekoittumista yksityiskohtaisesti. Näkymä Downcomers-laskentaverkosta on kuvassa 8.

Kuvassa 9 on havainnollistettu kuinka reaktoripaineastian eri komponentit on jaettu noodeihin eli laskentatilavuuksiin. Tästä kuvasta selviää myös se kuinka Apros Gradesista otettujen kuvien 6, 7 ja 8 eri osat liittyvät toisiinsa.



Kuva 9. Reaktoripaineastian nooditus.



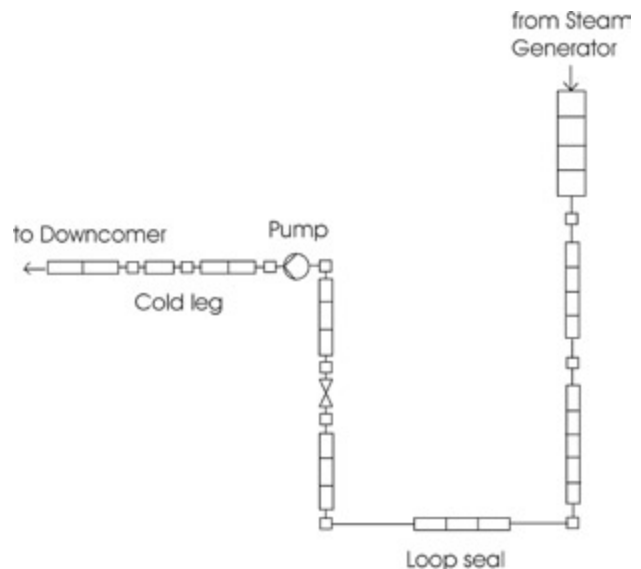
Kuva 10. Pääkiertopiiri yksi.

5.2.4 Pääkiertopiirit

Kaikki neljä pääkiertopiiriä ovat muuten samantyyppiset, mutta pelkästään piirissä yksi on vuoto ja vain piireissä yksi ja kaksi on sekä korkea- että matalapaine hätäjähdytysruiskutukset. Piirissä yksi on myös lisäksi muihin piireihin verrattuna säätöjärjestelmä, joka säätää kaikkien höyrystimien sekundääripainetta. Kuvassa 10 näkyy myös syöttöveden, pääkiertopumpun sekä matala- ja korkeapaine-hätäjähdytysveden säätöjärjestelmät. Koelaitteiston höyrystimen sekundääripuolelle on lisätty sähkövastus kompensoimaan lämpöhäviöitä. Tämä sähkövastus (SG Heater) on kuvattu malliin lisäämällä lämpörakenne höyrystimen sekundääripuolelle noodiin 73.

Kuvassa 11 on esitetty vesilukon ja kylmähaaran nooditus höyrystimestä alasmenotilaan saakka. Höyrystin on tehty valmiista pystyhöyrystin komponentista [10]. Pystyhöyrystin komponentti on tehty vastaamaan oikean ydinvoimalaitoksen höyrystintä, joten sen geometria ei vastaa aivan suoraan tätä koelaitteiston höyrystintä. Höyrystin

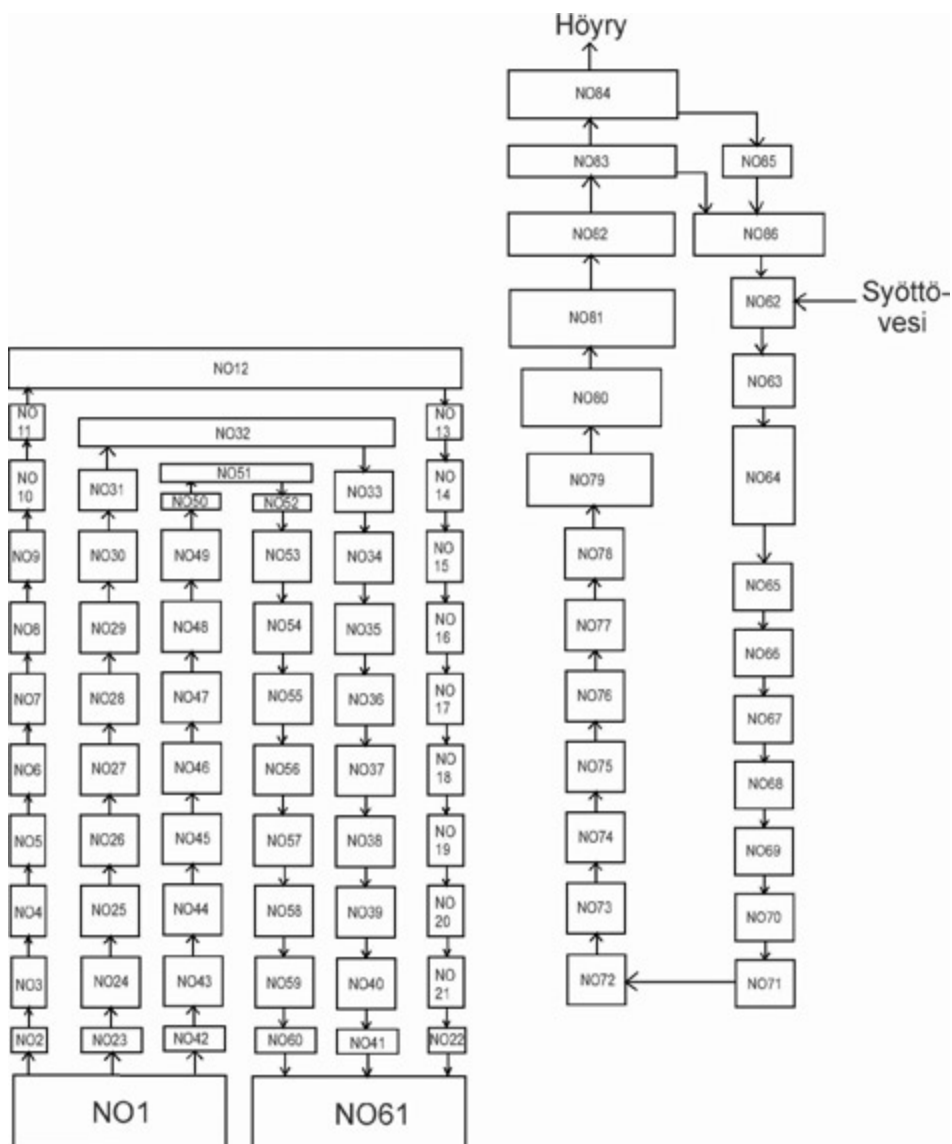
on jaettu kaikkiaan 86 noodiin, joista 61 noodia on primääripuolella. Primääri- ja sekundäärinooditus on kuvassa 12. Tässä kuvassa oleva noodi NO1 on höyrystimen sisäänmenokammio ja noodi NO61



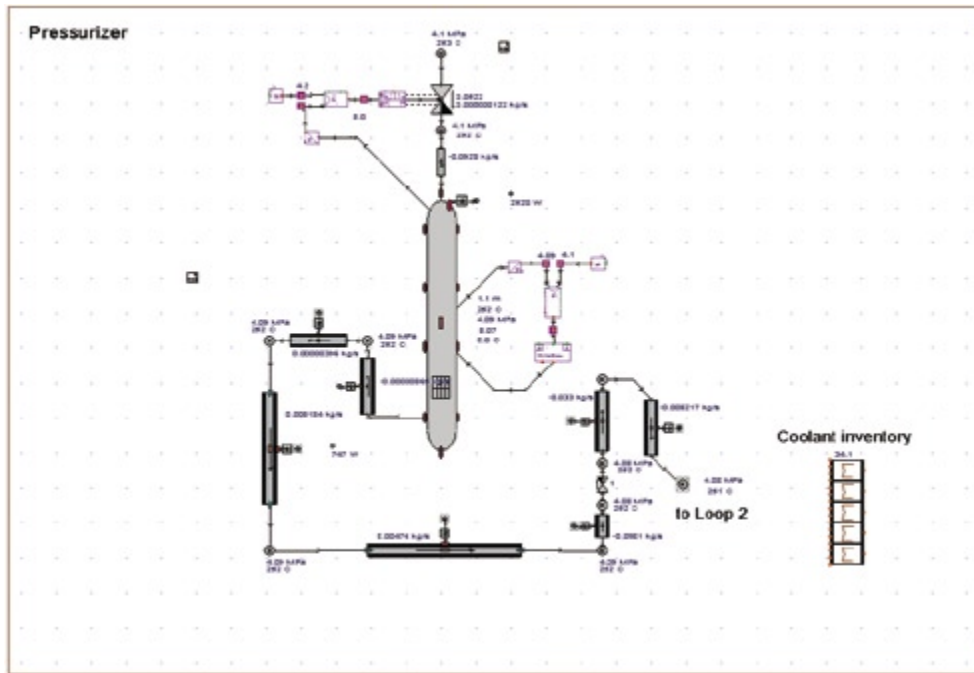
Kuva 11. Vesilukon ja kylmähaaran nooditus.

on höyrystimen ulostulokammio. Näiden noodien välillä olevat noodit kuvaavat höyrystinputkia. Höyrystimessä on höyrystinputkia kaikkiaan 28 kappaletta. Höyrystimen primääri- ja sekundääripiirien noodit on yhdistetty toisiinsa lämpörakenteilla, joten lämmönsiirto näiden piirien välillä on mahdollista. Höyrystin komponentissa putket

voidaan jakaa enimmillään viiteen eri ryhmään ja nyt putket on jaettu kolmeen ryhmään siten, että pisimpiä putkia on 6 kpl, seuraavassa ryhmässä on 11 kpl ja lyhimmässä ryhmässä 11 kpl. Pisimmässä putkiryhmässä putkia on vähemmän, koska koelaitteistossakin pitkiä putkia on vähemmän kuin lyhyitä.



Kuva 12. Höyrystimen primääri- ja sekundäärinooditus.



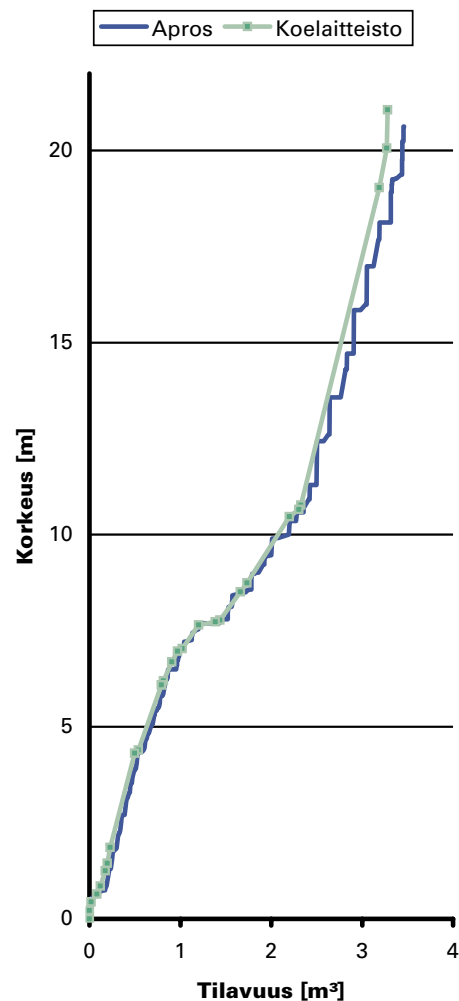
Kuva 13. Paineistin.

5.2.5 Paineistin

Paineistin on 13,38 metriä korkea ja se on jaettu 30 noodiin korkeussuunnassa. Noodeja on näinkin paljon siksi, että lämpötilan kerrostumisen kuvaaminen onnistuisi paremmin. Seinämän paksuus on 20 mm ja seinämässä on kolme lämpörakennenoodia. Paineistinlinja on kiinni höyrystinpiirin kaksi kuumahaarassa. Paineistimen paineen säätönä toimii vesiruiskutus ja lämmitysvastusten säätö, mutta tässä kokeessa ne eivät ole käytössä. Koska tässä kokeessa ei käytetä ruiskutusta, niin paineistimessa ei ole mallinnettu ruiskutusputtimen ympärillä olevaa sylinteriä. Apros Gradesin näkyvä Paineistin- laskentaverkosta (Pressurizer) on kuvassa 13.

5.3 Mallin tilavuuksien asettaminen vastaamaan koelaitteistoa

Mallin toiminnan kannalta on tärkeää, että eri komponenteilla on oikeat tilavuudet ja näin vettä tai höyryä on tietyssä paikassa oikea määrä. Apros-mallin ollessa siinä mielessä valmiina, että kaikki komponentit olivat käytössä ja virtaukset kulkivat stationääritilassa, piti tarkastaa, että eri komponenttien tilavuudet vastasivat koelaitteiston komponenttien tilavuuksia. Koelaitteiston eri osien tilavuuksia on mitattu sekä täyttämällä laitteisto vedellä että laskemalla [11]. Koelaitteiston ja mallin tilavuus on esitetty laitteiston korkeuden funktiona kuvassa 14. Mallin eri osien tilavuudet



Kuva 14. Primääripuolen kokonaistilavuus korkeuden funktiona.

on asetettu oikeaksi vertaamalla mallin tilavuuksia koelaitteiston tilavuuksiin.

Kuvasta 14 näkyy koko koelaitteiston primääripuolen tilavuus korkeuden funktiona verrattuna Apros-mallin vastaaviin arvoihin. Pientä eroa kuvan tilavuuksiin tulee siitä, että Apros-mallin korkeusarvot ovat noodien keskipisteiden arvoja. Eli noodin keskipisteen korkeutta vastaava tilavuus on oikeasti vasta noodin yläosassa. Primääripuolen kokonaistilavuus mallissa on 5,4 % suurempi kuin sen pitäisi olla. Tietokoneohjelmien mallien epävarmuus on yleensä 20 % suuruusluokkaa. Mallin tilavuusvirhe on siten laskentatarkkuuden epävarmuutta pienempi ja tämä 5,4 %:n virhe voidaan sallia.

5.4 Lämpöhäviöt

PKL koelaitteiston eri osien lämpöhäviöt selviävät raportista Determination of Thermal Losses in PKL Test Facility [12]. Apros-mallin lämpöhäviöt on asetettu vastaamaan mahdollisimman tarkasti tästä raportista selviäviä arvoja. Lämpöhäviöt syntyvät lämmön siirtyessä putken sisällä virtaavasta nesteestä konduktiolla eli johtumalla putkimateriaaliin ja putkimateriaalin läpi mahdolliseen eristeeseen. Ulkopinnasta lämpö siirtyy konvektiolla ilmaan. Myös säteilylämmönsiirtoa tapahtuu kuumemmas-ta pinnasta kylmempään, mutta se on konvektioon verrattuna mitättömän pientä lämpötilaerojenkin ollessa pieniä.

Primääripuolen lämpöhäviömittaukset on tehty reaktorin ylätilan lämpötilan ollessa 250 °C ja paineen 40 bar, pääkiertopumput eivät ole käyneet ja paineistimen pinnankorkeus on ollut 5 metriä. Sekundääripuolella on vallinnut kylläinen tila, höyrystimien pinnankorkeus on ollut 12 metriä ja höyry- ja syöttövesilinjat ovat olleet kiinni. Ympäristön lämpötila on ollut noin 20 °C. Vaikka pääkiertopumput eivät ole käyneet, niin pumppujen jäähtytys on kuitenkin ollut käytössä. Myös polttoainesauvojen säätösystemin ja muiden laitteiden jäähtytys reaktorin alatilassa on ollut käytössä.

Koelaitteiston sekundääripuolen lämpöhäviöitä määritettäessä primääripuoli on ollut tyhjä. Sekundääripuolen vettä on lämmitetty lämpöhäviöiden kompensoimiseen tarkoitetuilla sähkölämmittimillä, joiden maksimiteho on 18 kW yhtä höyrystintä kohti. Lämmittimien teho vastaa stationääritilassa lämpöhäviöiden suuruutta. Sekundääripuo-

len pinnankorkeus on ollut 12 metriä, höyry- ja syöttövesilinjat ovat olleet suljettuna ja neste on ollut kylläisessä tilassa. Mallin sekundääripuolen lämpöhäviöitä määritettäessä primääripuoli ei ole ollut kuitenkaan tyhjä vaan häviöt on asetettu samassa tilassa, kuin primääripuolen.

Koelaitteiston lämpöhäviöt primääripuolelta ovat 90 kW ja sekundääripuolelta 74 kW. Sekundääripuolen lämpöhäviöt käsittävät höyrylinjat ensimmäiseen venttiiliin saakka. Lämpöhäviöt on saatu vastaamaan referenssilaitoksen skaalattuja lämpöhäviöitä lisäämällä tiettyihin kohtiin sähkölämmittimiä ja eristystä häviöiden pienentämiseksi.

Esimerkiksi putken lämpöhäviön suuruus stationääritilassa saadaan määritettyä, kun tunnetaan sisäänmenon ja ulostulon lämpötilat, massavirta ja putkessa virtaavan aineen ominaislämpökapasiteetti. Näiden suureiden avulla lämpöhäviö saadaan laskettua yhtälön 2 avulla [13].

$$\Phi = q_m \cdot c_p \cdot (T_{\text{sis}} - T_{\text{ulos}}) \quad (2)$$

jossa Φ on lämpöhäviö, q_m on massavirta, c_p on ominaislämpökapasiteetti, T_{sis} on sisäänmenolämpötila ja T_{ulos} on ulostulolämpötila.

Koelaitteistossa käytetyistä eristyspaksuuksista ja materiaaleista ei ole tietoa, joten mallissa eristeenä on oletettu olevan mineraalivillaa. Eristyspaksuudet on sovitettu niin, että lämpöhäviöt tulevat oikean suuruiseksi. Joissain osissa eristyspaksuutena on käytetty vain yhtä millimetriä, tämä johtuu siitä, että häviötä on pitänyt saada kasvatettua. Apros-mallissa ei ole mahdollista eristää esimerkiksi putkesta vain osa ja jättää osa eristämättä, kuten koelaitteistossa voi olla, siksi eristepaksuudet eivät ole totuuden mukaisia. Eri kokonaisuudet voisi tietenkin tehdä pienemmistä osista, jolloin eristyskin vastaisi enemmän totuutta, mutta tämä ei ole tarkoituksenmukaista. Lämpöhäviöitä on säädetty oikean suuruiseksi myös muuttamalla lämmönsiirtokerrointa eristeen pinnasta ympäristöön. Kertoimen arvot mallissa vaihtelevat välillä 10–40 W/m²K. Alun perin koelaitteiston lämpöhäviöt ovat olleet suuremmat kuin referenssilaitoksessa, mutta lisäämällä eristystä häviöt on saatu vastaamaan todellista ydinvoimalaitosta. Häviöiden suuruus johtuu siitä, että koelaitteiston pinta-ala-tilavuussuhde on suurempi kuin oikeassa laitoksessa.

Taulukko I. Laitteiston ja mallin lämpöhäviöt 250 °C:n lämpötilassa.

Komponentti	PKL [kW]	Malli [kW]	Ero [±%]
Reaktorin sydän	20	17,9	-11
Ylätila	7	6,6	-6
Alatila	6	6,1	+2
Alasmenokammio	5	4,3	-14
Alasmenoputket	6	5,7	-5
Kuumahaaran putket	7	6,5	-7
Vesilukot	8	7,3	-9
Kylmähaaran putket ja pumput	27	26,6	-1
Paineistin	3,8	3,0	-21
Paineistinlinja	0,5	0,7	+40
Sekundääri	74	60,4	-18
Yhteensä	164,3	145,1	-11

Koelaitteiston ja mallin lämpöhäviöt selviävät taulukosta I. Mallin lämpöhäviöt on asetettu tilanteessa, jossa ylätilan lämpötila on 250 °C ja paine 40 bar. Reaktorin sydämen yläpuolella oleva piste on otettu pois simuloinnista ja tälle on asetettu edellä olevat alkuarvot. Kokonaismassavirta on tällöin noin 3,2 kg/s ja pääkiertopumput on pysäytetty. Koelaitteiston lämpöhäviöiden suuruudet eivät ole absoluuttisen oikeita, vaan nekin sisältävät mittausvirhettä. Virheen suuruus yksittäisissä komponenteissa voi raportin mukaan olla jopa ±15 %. Koko primääripuolen virhe on ±10 % ja sekundääripuolen ±6,2 %.

Mallin häviöitä asetettaessa primääripuoli oli täynnä vettä ja sekundääripuolen vettä lämmitettiin primääripuolella olevalla kuumemmalla vedellä. Mallissa höyrystimen lämpöhäviöiden suuruus oli siis yhtä suuri kuin primääripuolelta sekundääripuolelle siirtyvä lämpöteho. Höyrystimen lämpöhäviöitä asetettaessa tilanne on siis ollut hieman erilainen kuin lämpöhäviökokeissa, joten pientä eroa voi tulla esimerkiksi rakenteita pitkin tapahtuvan lämmönjohtumisen vaikutuksesta.

Koelaitteiston lämpöhäviöt oli määritelty myös ylätilan ollessa 150 °C:n lämpötilassa. Nyt kun lämpöhäviöt oli saatu oikeaksi 250 °C:n lämpötilassa, oli häviöt helppo tarkastaa ajamalla malli 150 °C:n lämpötilaan. Taulukosta II näkyy koelaitteiston ja mallin häviöt 150 °C:n lämpötilassa. Tulokset on otettu mallista, kun ylätilan lämpötila on ollut 150 °C ja paine 40 bar.

Mallin reaktorin sydämen lämpöhäviö on mal-

Taulukko II. Laitteiston ja mallin lämpöhäviöt 150 °C:n lämpötilassa.

Komponentti	PKL [kW]	Malli [kW]	Ero [±%]
Reaktoripaineastia	19,5	22,7	+16
Kuumahaaran putket	2,5	3,6	+44
Vesilukot	3,5	4,1	+17
Kylmähaaran putket ja pumput	12	15	+25
Sekundääri	29,5	24	-19
Yhteensä	67	69,4	+4

linnettu siten, että lämpö siirtyy ensin sydämen 21 noodista sydämen ohituksen toimivaan putkeen ja putkesta lämpö siirtyy ilmaan. Sydämen lämpörakenneverkko näkyy kuvan 6 oikeassa reunassa. Höyrystimien lämpöhäviöt, eli sekundääripuolen häviöt, on määritelty samalla tavalla, sillä erolla, että häviöt on jaettu yhteensä 12 noodiin yhdessä höyrystimessä. Lämpöhäviökokeissa pääkiertopumput ovat olleet pysäytettynä, mutta pumppujen jäähditys on kuitenkin toiminut aivan kuten pumppujen käydessäkin. Eli pumppua on jäähdytetty syöttämällä pumpun jäähdityspuolelle vettä, joka on siirtänyt pumpusta lämmön mukanaan. Tämä pumppujen jäähdityshäviö on kuvattu malliin lisäämällä lämpörakennekomponentit ennen pumppua ja pumpun jälkeen oleviin noodeihin.

5.5 Painehäviöt

PKL-koelaitteiston painehäviöt on mitattu laitteiston ollessa täynnä kylmää vettä. Veden lämpötila on ollut 33 °C, paine 40 bar ja massavirta yhdessä kierto-putkissa 23,5 kg/s [14]. Veden massavirtana on mittauksissa käytetty useita muitakin arvoja, mutta kyseisessä raportissa on esitetty tulokset vain tälle yhdelle massavirralle. Painehäviöt syntyvät putken pinnankarheuden ja erilaisten kertavastuksien johdosta. Näistä kertavastukset ovat huomattavasti suurempi tekijä. Kertavastuksia aiheuttavat mm. putkimutkat, venttiilit, kuristukset ja laipat.

Malli saadaan ajettua tähän edellä mainittuun tilaan samalla tavalla kuin lämpöhäviöidenkin tapauksessa, ottamalla reaktorisydämen yläpuolella oleva noodi pois simuloinnista ja antamalla tälle lämpötilaksi 33 °C ja paineeksi 40 bar. Paineistin on erotettu muusta järjestelmästä sulkemalla paineistinlinjassa oleva venttiili. Jokaiselle pääkiertopumpulle asetetaan massavirraksi 23,5 kg/s ja virtaussuunnassa ennen pumppua oleva läppäventtiili asetetaan auki.

Läppäventtiili on asennettu koelaitteistoon, jotta pääkiertopumpun painehäviö vastaisi paremmin todellisen ydinvoimalaitoksen pääkiertopumpun painehäviötä. Laitteiston pumput ovat toisin sanoen ylimitoitettut. Painehäviön suuruuden ero koelaitteiston ja voimalaitoksen välillä johtuu myös erilaisista pumppujen juoksupyöristä ja rakenteista. Läppäventtiili toimii siten, että pumpun ollessa pysäytettynä sen virtauspoikkipinta-ala on noin 20 % koko alasta eli venttiili kuvaa pysäytettynä olevan pumpun painehäviötä. Pumpun käydessä venttiili on täysin auki. Mallissa ei riittänyt pelkääntään venttiilin lisääminen kuvaamaan pysäytetyn pumpun painehäviötä vaan massavirta kasvoi luonnonkierrolla liian suureksi. Pysäytetylle pumpulle annettiin lisäksi kertavastuskerroin 30 (loss coefficient of stopped pump).

Reaktorisydämen ohituksen (Core bypass) yläpää on kuristettu siten, että sen kautta kulkee pumppujen käydessä noin 5 % kokonaismassavirrasta. Tämä on saatu koelaitteistossa aikaan kahdeksalla halkaisijaltaan 8 mm olevilla reiillä. Mallissa ohitusta kuvaa yksi putki ja kuristus on tehty virtaushaara-komponentilla. Mallissa ohituksen kautta kulkee 5 % kokonaismassavirrasta eli 4,72 kg/s. Sydämen läpi kulkeva massavirta on 93,6 kg/s.

Ylätilan ohituksen kautta kulkevan veden massavirta on 0,5 % kokonaismassavirrasta pumppujen käydessä. Massavirta on saatu asetettua oikeaksi lisäämällä ohituslinjaan kuristuslaippa, jonka halkaisija on 3,9 mm. Mallissa tämän ohituksen massavirta vastaa myös noin 0,5 % kokonaismassavirrasta pumppujen käydessä.

Painehäviöt koelaitteistosta ja simulointimallista on esitetty taulukossa III. Tuloksista on eliminoitu korkeustermien vaikutus painehäviöön yhtälön 3 avulla. Painehäviön yhtälö saadaan johdettua energiayhtälöstä [13].

$$\Delta p = p_1 + \rho \cdot g \cdot (z_1 - z_2) - p_2 \quad (3)$$

jossa Δp on painehäviö, p on paine, ρ on nesteen tiheys, g on maanvetovoiman aiheuttama putoamiskiihtyvyyden ja z on korkeus.

Painehäviöihin vaikuttavat kuitenkin erilaiset virtausnopeudet, koska laitteistossa on erisuuria virtauspoikkipinta-aloja. Suuntaa antavia arvoja painehäviön kertoimelle K , form loss coefficient, saadaan ratkaistua yhtälöstä 4 [9]. Tällä yhtälöllä saadut tulokset ovat kuitenkin vain suuntaa anta-

Taulukko III. Koelaitteiston ja mallin painehäviöt komponenteittain.

Komponentti	PKL [Pa]	Malli [Pa]	Ero [%]
Pumppu	-240000	-251361	-4,7
Höyrystin	80000	86007	7,5
Vesilukko	49000	47569	-2,9
Läppäventtiili (auki)	13000	13196	1,5
Kylmähaara	6000	6102	1,7
Paineastia	94000	95340	1,4
Alasmenokammio	10000	10018	0,2
Alasmenoputket	9000	9131	1,5
Alatila	18000	18588	3,3
Sydän	41000	40894	-0,3
Ylätila	16000	16709	4,4
Kuumahaara	3000	3147	4,9
Yhteensä	245000	251361	2,6

via ja lopulliset kertoimet on sovitettu kokeilemalla. Yhtälö antaa oikeansuuruisen arvon painehäviötä kuvaavalle kertoimelle K , mutta lasketun ja malliin todellisuudessa lisätyn arvon erot johtuvat siitä, että mallissa ei ole välttämättä kuvattu aivan jokaista virtauskanavissa olevaa mutkaa ja kuristusta ja laskennassa huomioidaan myös seinämäkitka.

$$\Delta p = K \cdot \rho \cdot v^2 / 2 \quad (4)$$

jossa K on painehäviötä kuvaava kerroin ja v on virtausnopeus.

5.6 Boorittoman veden tulpan eteneminen kylmähaarassa

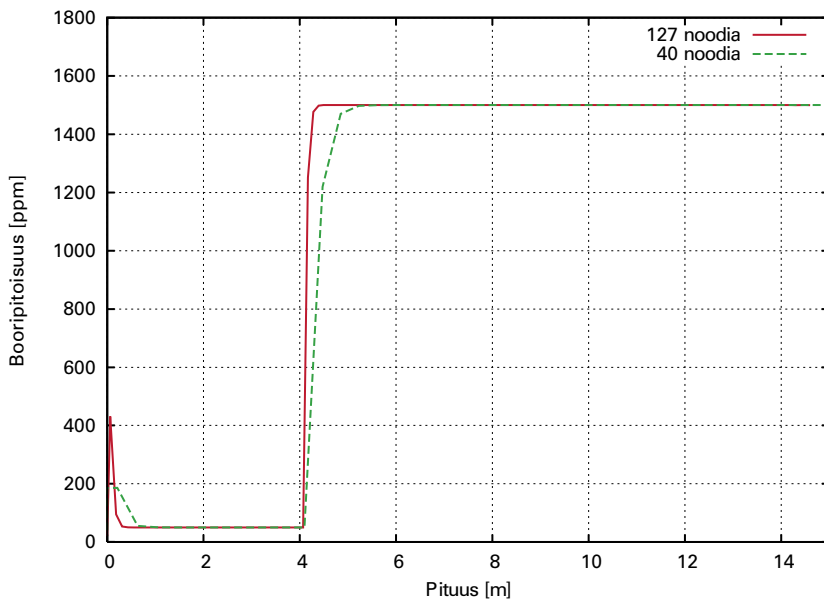
Boorittoman veden tulpan etenemistä kylmähaarassa testattiin mallintamalla pelkääntään yksi vesilukko ja kylmähaara ja mallintamisen jälkeen suorittamalla laskenta kahdella eri ratkaisumenetelmällä ja kahdella erilaisella noodijaolla. Noodijakoina käytettiin harvempaa 40 noodin jakoa ja tiheämpää 127 noodin jakoa. 40 noodin jako vastaa tarkemmin laskentamallissa käytettyä noodijakoa Eroa noodijakoon tulee pumpun ja venttiilin puuttumisesta. Kylmähaaran alkuun asetettiin noin neljän metrin mittaiselle osalle veden booripitoisuudeksi 50 ppm, muualla putkessa booripitoisuus oli 1500 ppm ja putkeen syötettiin 1500 ppm booripitoista vettä massavirralla yksi kg/s. Tämä massavirta on samaa suuruusluokkaa kuin luonnonkierron käynnis-

tyessä pääkiertopiirissä. Alkutilanne on esitetty kuvassa 15.

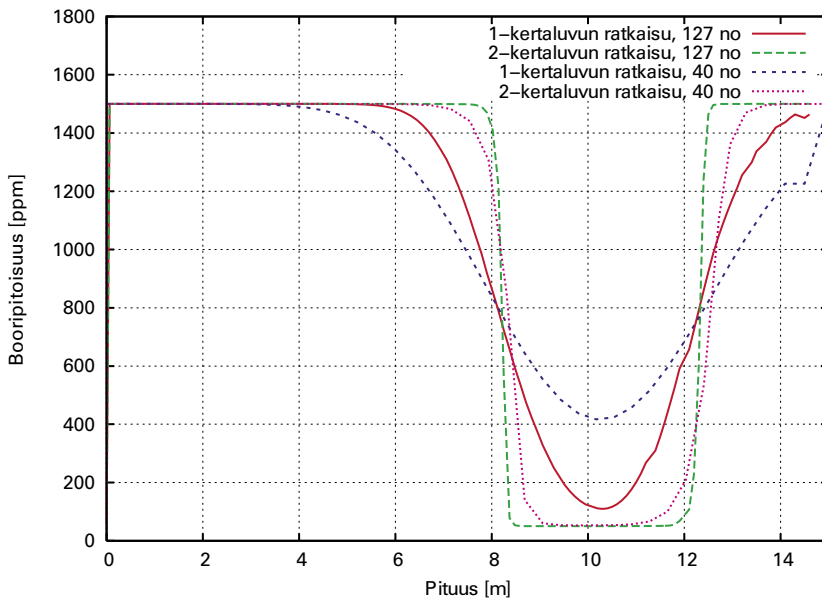
Apros-ohjelmassa on valittavana konsentraatio-
ratkaisulle kaksi eri ratkaisumallia: ensimmäisen
ja toisen kertaluvun diskretointi [15]. Kuten kuvasta
16 nähdään, toisen kertaluvun ratkaisumallilla
laskemalla saadaan tulppa etenemään paremmin
tulppana, vaikka käytettäisi harvempaakin noodijakoa.
Ensimmäisen kertaluvun ratkaisulla boori-
pitoisuudet tasoittuvat huomattavasti nopeammin
ja tulppa lähtee leviämään. Lisäksi molemmilla rat-
kaisumalleilla tulpan etenemiseen vaikuttaa myös
laskennassa käytettävä aika-askel. Mitä pienempi
aika-askel, sitä jyrkempänä boori-
pitoisuuden rajat

säilyvät. Laskennassa maksimi aika-askeleena on
käytetty 0,05 sekuntia.

Simuloitaessa pienen vuodon koetta halutaan
tarkastella juuri boorittoman veden tulpan etene-
mistä kylmähaarassa. Kuvan 16 tuloksista huoma-
taan, että ratkaisumenetelmänä kannattaa käyttää
toisen kertaluvun ratkaisua ja mahdollisimman
tiheää nooditusta. Mallissa päädyttiin kuitenkin
käyttämään vesilukon ja kylmähaaran noodijakona
40 noodia vastaavaa jakoa, koska toisen kertalu-
vun ratkaisujen välillä ero ei ole yhtä suuri kuin
ensimmäisen kertaluvun ratkaisujen noodijaoissa.
Lisäksi, jos iso malli jaetaan kovin pieniin noodei-
hin, niin laskenta muuttuu raskaammaksi.



Kuva 15. Boorittoman veden tulppa kokeen alussa eri noodijaoilla.



Kuva 16. Boorittoman veden tulppa ajanhetkellä 40 s eri laskentamenetelmillä.

6 Pienen vuodon kokeen simulointi Apros-mallilla

PKL-koelaitteistosta tehdyllä simulointimallilla laskettiin PKL III E2.2 koe useita kertoja, koska alkutilan asettaminen oli hankalaa epästationääritilasta johtuen. Simuloinnissa alkutila pyrittiin kuitenkin saamaan mahdollisimman samanlaiseksi kuin koelaitteistossa oli ollut. Tässä on esitetty yhden simuloinnin tulokset. Liitteessä on esitetty lisää simuloinnista tulostettua tietoa. Alkutilan arvoista kokeen etenemiseen vaikuttavat eniten alkutilan lämpötilat, paine-erot, pinnankorkeudet ja kokonaisvesimäärä.

6.1 Alkutila

Koelaitteiston ja mallin alkutilan arvot selviävät taulukosta IV.

Missään höyrystinpiirissä ei ollut kiertoa. Kaikki pumput olivat pysähdyksissä, eikä luonnonkiertoakaan tapahtunut. Häätäjäähdytysvettä syötettiin kylmähaarioihin yksi ja kaksi ja kylmähaarassa yksi oleva vuoto oli auki. Piireissä kolme ja neljä alkutila oli lähes identtinen. Näiden vesilukkojen booripitoisuus oli kauttaaltaan alle 50 ppm ja lämpötila noin 240 °C, kylmähaarojen booripitoisuudet olivat 400 ppm. Kylmähaaran kaksi booripitoisuus oli korkein johtuen tähän haaraan syötettävästä korkeabooripitoisesta häätäjäähdytysvedestä. Tässä haarassa boorittoman veden tulppa oli vain höyrystimen ulostulon alapuolella olevan pystysuoran osan kokoinen. Kylmähaarassa yksi boorittoman veden tulppa oli hieman suurempi kuin kylmähaarassa kaksi, johtuen siitä että suurin osa kylmähaaraan syötettävästä vedestä meni suoraan ulos vuodosta. Kylmähaarojen yksi ja kaksi lämpötilat olivat noin parikymmentä astetta pienemmät kuin muissa kylmähaaroissa.

Mallia ei asetettu kokeen alkutilaan samalla tavalla ajamalla kuin koelaitteistolle oli tehty, vaan alkutila asetettiin ottamalla aina jokin piste tai noodi pois simuloinnista ja antamalla sille

Taulukko IV. Alkutila.

	PKL-koelaitteisto	Apros-malli
Jäähdytysveden määrä järjestelmässä	1440 kg	1404 kg
Sydämen lämmitysteho	530 kW	530 kW
Ylätilan paine	4,05 bar	4,08 bar
Sydämen ulostulolämpötila	251 °C	252 °C
Paineistimen lämpötila	251 °C	252 °C
Paineistimen pinnankorkeus	1,1 m	1,1 m
Vuodon määrä	1,1 kg/s	1,1 kg/s
Hätäjäähdytysveden lämpötila	20–22 °C	21 °C
Hätäjäähdytysveden booripitoisuus	2200 ppm	2200 ppm

halutut arvot ja ajamalla sen jälkeen mallia. Toinen tapa saavuttaa alkutila oli kirjoittaa käskyjonoja, jotka saatiin sitten luettua Aprosin käskyllä ”use from file” (uff). Näillä käskyjonoilla pystyttiin asettamaan helposti esimerkiksi jonkin vesilukon booripitoisuus vastaamaan koelaitteiston alkutilaa. Alkutilan saavuttaminen oli siinä mielessä hankalaa, että koe ei lähtenyt liikkeelle stationääritilasta. Jos mallia laski alkutilassa eteenpäin, niin höyrystimessä tapahtui lauhtumista, jolloin vesilukkojen vesimäärät muuttuivat.

Veden lämpötilat mallissa asetettiin antamalla veden entalpialle tiettyä lämpötilaa vastaava arvo. Lämpötilojen asettamisen jälkeen mallia oli ajettava jonkin aikaa eteenpäin, jotta myös putkien seinämien lämpötilat asettuisivat oikeiksi.

6.2 Kokeen eteneminen

Kokeen aikana säädettäviä parametreja olivat sekundääripuolella syöttöveden massavirta, tuorehöyrän paine ja höyrystimissä lämpöhäviöitä kompensoivien sähkövastusten teho. Syöttöveden massavirtaa säädettiin siten, että höyrystimen pinnankorkeus pysyi 12,2 metrissä. Höyrystimien

jähdytysnopeus kokeen aikana oli 100 K/h. Tuorehöyryn painetta säädettiin syöttämällä taulukosta asetusarvo venttiiliä ohjaavalle toimilaitteelle. Tuorehöyryn paine määrää pitkälti myös primäärilämpötilan ja -paineen käyttäytymisen aina siihen asti kunnes matalapainehäätäjähdetyksvettä aletaan syöttää. Jokaisessa höyrystimessä olevien lämmittimien teho oli alussa 16 kW ja kokeen aikana se pieneni neljään kilowattiin. Reaktorin ylätilassa olevan lämmittimen teho mallissa oli vakio 0,7 kW koko kokeen suorituksen ajan.

Primääripuolella säädettiin reaktorisydämen tehoa ja häätäjähdetyksvesien syöttöä. Sydämen teho pienenee kokeen aikana 530 kW:sta 335 kW:iin. Tämän tehon säätö on toteutettu siten, että jokaisen sydämen lämpörakennenuodin suhteellinen teho pienenee ajan funktiona. Korkeapaineista häätäjähdetyksvettä syötetään yhtälön 5 [8] mukaan ajanhetken 6000 sekuntia saakka. Matalapaineista häätäjähdetyksvettä syötetään taas yhtälön 6 [8] mukaan primääripaineen ollessa alle 10 bar.

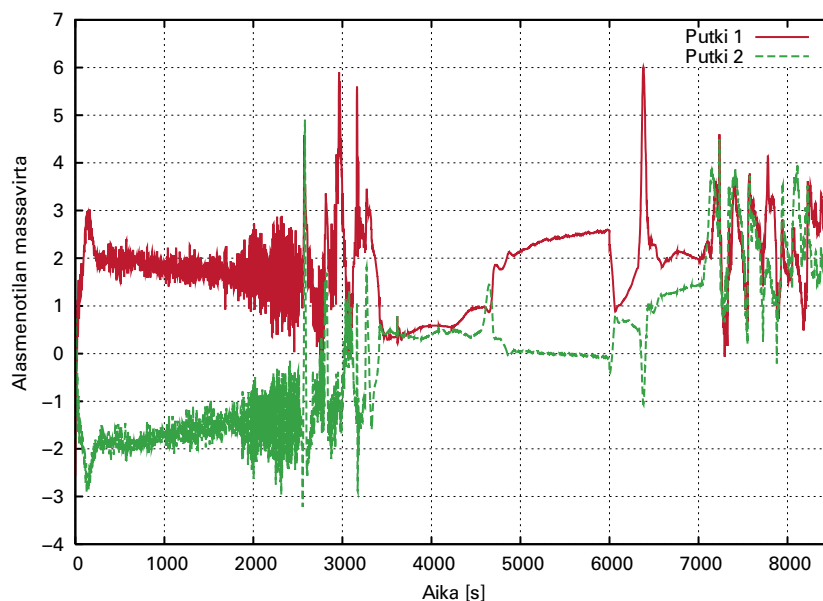
$$q_{mHP} = 0,036 \cdot (108 - p)^{0,57} \quad (5)$$

$$q_{mLP} = 0,503 \cdot (10,35 - p)^{0,58} \quad (6)$$

Alasmenotila koostuu alasmenokammioista ja alasmenoputkista, joita on kaksi kappaletta. Kun luonnonkierto ei vielä ole lähtenyt liikkeelle missään piirissä kokeen alussa, lähtee vesi virtaamaan toisessa putkessa alaspäin ja nousee toista putkea

ylös. Alasmenokammioon tulee kakkospiiristä kylmää häätäjähdetyksvettä, joka painuu tiheämpänä putkia pitkin reaktorin alatilaan. Tämä kylmä vesi ei pääse nousemaan reaktorin sydämeen, koska sydämen läpi kokeen alussa menevä massavirta on pienempi kuin alasmenoputkia pitkin tuleva veden massavirta. Alasmenoputkissa tapahtuvaa kiertoliikettä pitää yllä pääasiassa se, että alasmenokammioon tulevan veden keskilämpötila laskee koko ajan syötettävän häätäjähdetyksveden vaikutuksesta. Ylhäällä kammiossa olevan veden lämpötila pysyy koko ajan pienempänä kuin putken alaosassa olevan. Näin ollen ylhäällä olevan veden tiheys on suurempi ja raskaampana se painuu alaspäin ja alhaalla oleva lämpimämpi ja kevyempi vesi virtaa toista putkea pitkin ylöspäin. Alasmenoputkissa tapahtuva kiertoliike pysähtyy ja virtaussuunta on molemmissa putkissa alaspäin, kun luonnonkierto lähtee liikkeelle ensimmäisessä piirissä. Putkissa tapahtuva kiertoliike näkyy kuvasta 17.

Toinen kiertoliikettä hetkittäin ylläpitävä ilmiö on sydämeen syntyvä sisäinen kierto. Sydämessä tapahtuva höyrystyminen saa siellä olevan vesimassan heilahtelemaan ylös alas. Lämpivän veden ja höyryn seos virtaa sydämessä ylöspäin ja palaa ohituskanavaa pitkin takaisin alas. Vesimassan heilahdellessa sydämen alatilaan pääsee lämmintä vettä, joka lähtee nousemaan alasmenoputkia pitkin ylöspäin.



Kuva 17. Apro-mallin alasmenotilan putkien massavirta.

6.3 Tulokset

PKL-koelaitteistolla suoritetusta kokeesta oli mitaustulokset [8], joten Apros-simulointiohjelmalla saatuja tuloksia oli helppo verrata koelaitteistolla saatuihin tuloksiin. Kuvasta 18 nähdään primääri- ja sekundääripaineen käyttäytyminen kokeen aikana koelaitteistossa ja Apros-mallissa. Alussa paine laskee höyrystimien jäädytyksen vaikutuksesta. Paineen laskettua kymmeneen bariin aloitetaan matalapainehätäjäähdytysveden syöttäminen, jolloin paine jatkaa jonkin aikaa laskemistaan, kunnes se lähtee nousuun. Matalapainehätäjäähdytysveden syöttäminen lopetetaan paineen nousua takaisin kymmeneen bariin. Apros-mallissa primääripaine pyrkii alussa nousemaan hieman ja on koko paineen laskuvaiheen ajan hieman mittaustuloksia korkeammalla. Primääripaine nousee korkeammalle myös matalapainehätäjäähdytysveden syöttämisen jälkeen. Ajanhetkellä 6000 s lopetetaan hätäjäähdytysveden syöttäminen, jolloin koelaitteiston vesimäärä lähtee pienentymään ja tällöin myös paine laskee.

Taulukkoon V on koottu kokeen aikana tapahtuvat tärkeimmät ilmiöt ja tapahtumat sekä niiden ajankohdat mittauksissa ja laskennassa. Eniten eroa tapahtumien ajoissa on luonnonkiertojen liikkeellelähtöjärjestyksissä, koska eri piirit eivät lähde liikkeelle aivan samassa järjestyksessä mittauksessa ja laskennassa. Piirissä kaksi luonnonkierto lähtee liikkeelle jo ajanhetkellä 2931 s ja

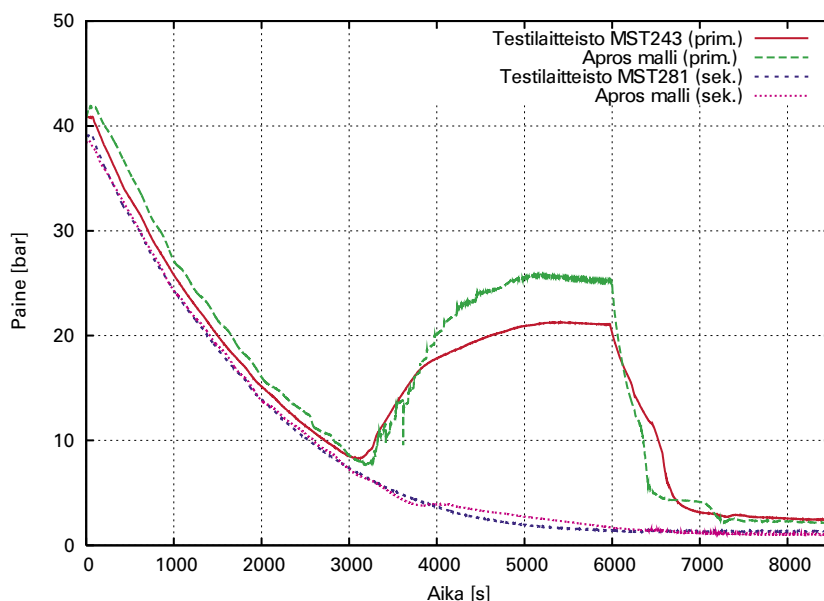
Taulukko V. Kokeen tärkeimmät tapahtumat.

Tapahtuma	Tapahtuman ajankohta laskennassa	Tapahtuman ajankohta mittauksissa
Koe aloitetaan ja vuoto avataan	0 s	0 s
Jäähdytteen minimimäärä saavutetaan	940–1140 s (1220 kg)	800–1200 s
Primääripiirin paine laskee alle 10 bar ja matalapainehätäjäähdytysveden syöttö aloitetaan	2800 s	2700 s
Luonnonkierron alku piirissä 3	3266 s	3180 s
Primääripiirin paine nousee yli 10 bar ja matalapainehätäjäähdytysveden syöttö lopetetaan	3326 s	3320 s
Luonnonkierron alku piirissä 4	4300 s	3020 s
Korkeapainehätäjäähdytysveden syöttö lopetetaan	6000 s	5980 s
Luonnonkierron alku piirissä 2	2931 s (6325 s)	6450 s
Luonnonkierron alku piirissä 1	7056 s	3830 s

kestää 125 s. Uudestaan luonnonkierto käynnistyy taas ajanhetkellä 6325 s.

Kuvassa 19 on esitetty veden määrä primääripiirissä kokeen aikana, vuodon massavirta ja matalapaine- ja korkeapainehätäjäähdytysvesien yhteenlaskettu massavirta. Kuvasta huomataan, että primääripiirin tyhjeneminen lakkaa samaan aikaan, kun vuodon ja hätäjäähdytysvesien massavirrat ovat yhtä suuret.

Kuvassa 20 on vuodosta virranneen veden mas-



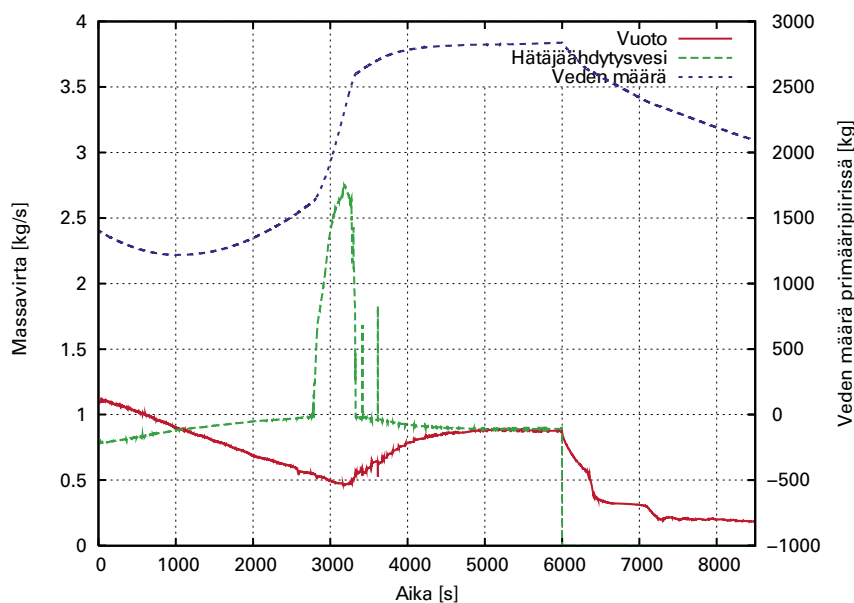
Kuva 18. Primääri- ja sekundääripaine.

sa ajan funktiona. Aikavälillä 2000–5000 sekuntia virranneen veden massa Apros-simuloinnissa on hieman pienempi kuin koelaitteistolla suoritettussa kokeessa. Koetta laskettaessa korkeapainehätäjäähdytysvesien yhteenlaskettu massavirta (kuva 21) on ollut suurempi kuin kokeessa. Myös matalapainehätäjäähdytysvesien massavirta on noussut suuremmaksi kuin kokeessa. Kun laskennassa vuotoveden määrä on ollut hieman pienempi ja laitteistoon syötettävän veden määrä on taas ollut suurempi kuin kokeessa, on näiden johdosta laitteiston vesimäärä noussut suuremmaksi kuin kokeessa (kuva 21).

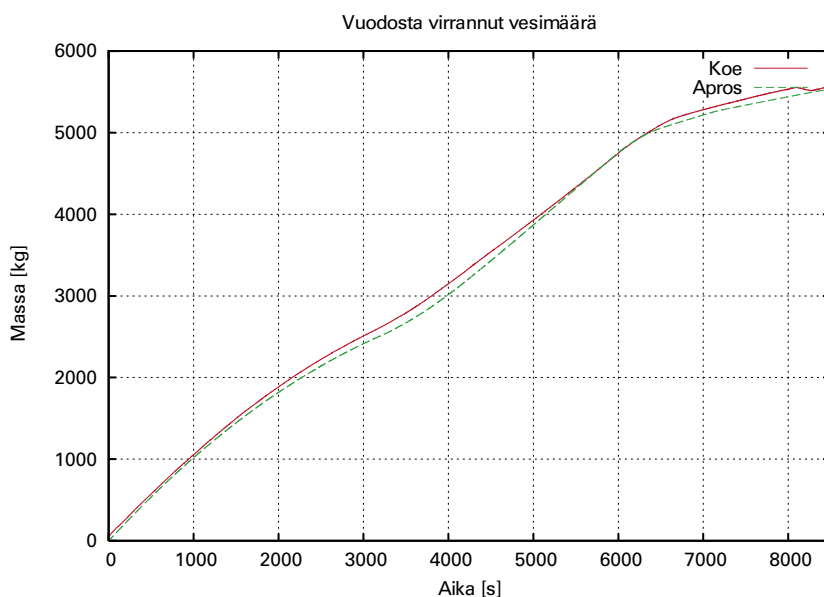
6.3.1 Luonnonkierron alkaminen kiertopiireissä

Eri pääkiertopiirien luonnonkierron liikkeellelähtöjärjestys kokeessa oli neljä, kolme, yksi ja kaksi. Piirissä neljä luonnonkierto lähti liikkeelle ajanhetkellä 3020 s, piirissä kolme 60 sekuntia myöhemmin ajanhetkellä 3080 s, piirissä yksi ajanhetkellä 3830 s ja piirissä kaksi vasta ajanhetkellä 6450 s, kun korkeapainehätäjäähdytysveden syöttö oli lopetettu.

Apros-simuloinnissa luonnonkiertojen alkamisjärjestys pääkiertopiireissä oli kaksi, kolme, neljä ja yksi, jos luonnonkierron alkamiseksi katsotaan



Kuva 19. Veden määrä sekä hätäjäähdytysvesien ja vuodon massavirta laskennassa.



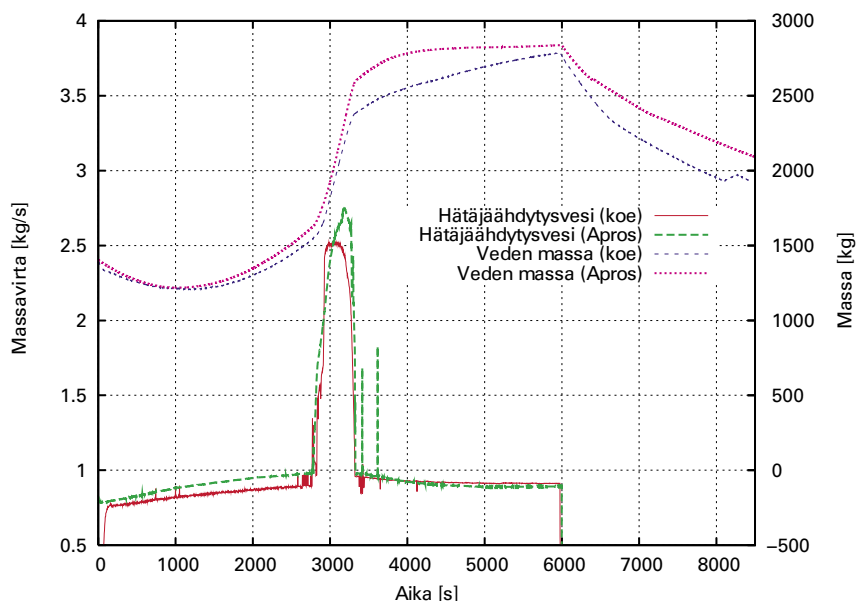
Kuva 20. Kylmähaaran yksi vuodosta virranneen veden massa.

ajanhetki, jolloin luonnonkierto alkaa ensimmäisen kerran. Kun luonnonkierto on alkanut ensimmäisen kerran piirissä kaksi, on kyseessä ollut kaksifaasivirtaus. Tämä on nähtävissä selvästi etenkin höyrystimen pinnankorkeuksien käyttäytymisestä kuvasta 28. Piirissä kaksi luonnonkierron alkaessa höyrystinputket eivät ole olleet täynnä vettä. Jos taas luonnonkierron alkamisena pidetään yksifaasiluonnonkierron alkua, on järjestys kolme, neljä, kaksi ja yksi. Eli luonnonkierto alkaa ensin piireissä joihin ei syötetä hätäjähdytysvettä, kuten kokeessakin tapahtui.

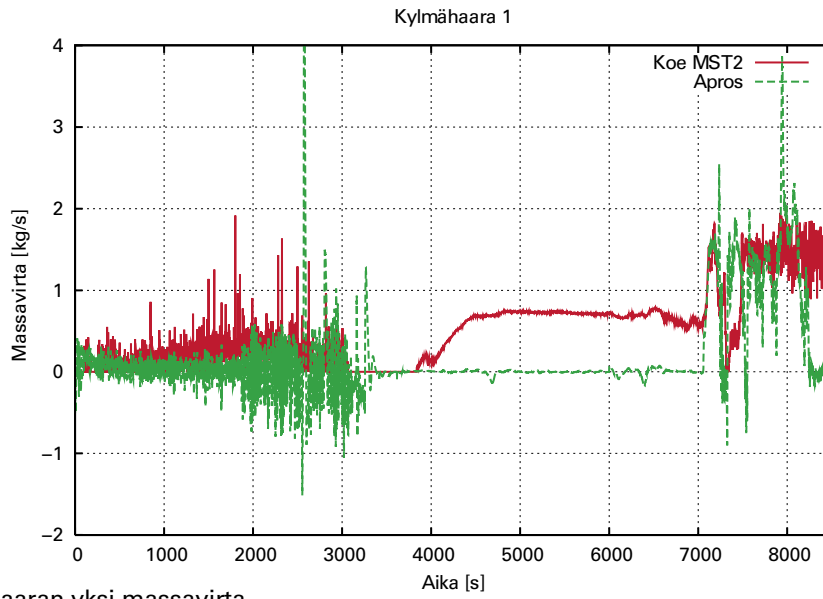
Ensimmäisenä liikkeelle lähti piiri kaksi ajanhetkellä 2931 s, mutta luonnonkierto tässä piirissä pysähtyi vielä ajanhetkellä 3056 s. Tällöin luonnonkierto oli kaksifaasivirtausta ja virtaus kulki vain höyrystimen pisintä putkiryhmää pitkin. Toisen kerran luonnonkierto tässä piirissä lähti liikkeelle ajanhetkellä 6325 s. Piirin kaksi ensimmäinen liikkeellelähtö on tärkeä, koska tällöin boorittoman veden tulppa lähti liikkeelle tästä piiristä. Myöhemmin booripitoisuudessa ei enää tapahtunut

huomattavaa alenemista. Luonnonkierto piirissä kolme alkoi ajanhetkellä 3266 s, piirissä neljä 4300 s ja piirin yksi luonnonkierto alkoi ajanhetkellä 7056 s.

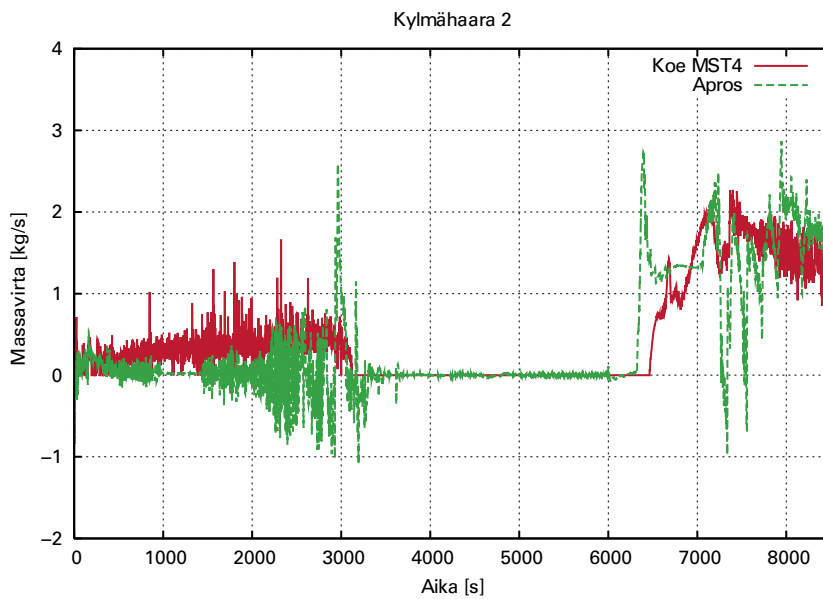
Eniten eroa luonnonkierron liikkeellelähdyssä verrattuna koelaitteistolla suoritettuun kokeeseen on siis piirissä yksi, joka lähtee liikkeelle piirin kaksi kanssa vasta sen jälkeen, kun korkeapainehätäjäähdytysveden syöttö on lopetettu. Luonnonkierron alkuun vaikuttaa paljon se, kuinka vesimäärä on jakautunut kokeen alkutilanteessa eri piirien kesken ja kuinka vesimäärät ja pinnankorkeudet muuttuvat kokeen kuluessa. Jos kokeen alussa esimerkiksi vesilukkojen pinnankorkeudet ovat suuret, niin kyseisessä piirissä luonnonkierto lähtee liikkeelle aikaisemmin. Piirien kolme ja neljä massavirta kasvaa suuremmaksi kuin kokeessa, mutta se johtuu siitä, että nyt vesi virtaa vain kahden pääkiertopiirin kautta ja kokeessa se on virrannut kolmesta piiristä. Eri piirien massavirrat on esitetty kuvissa 22–25.



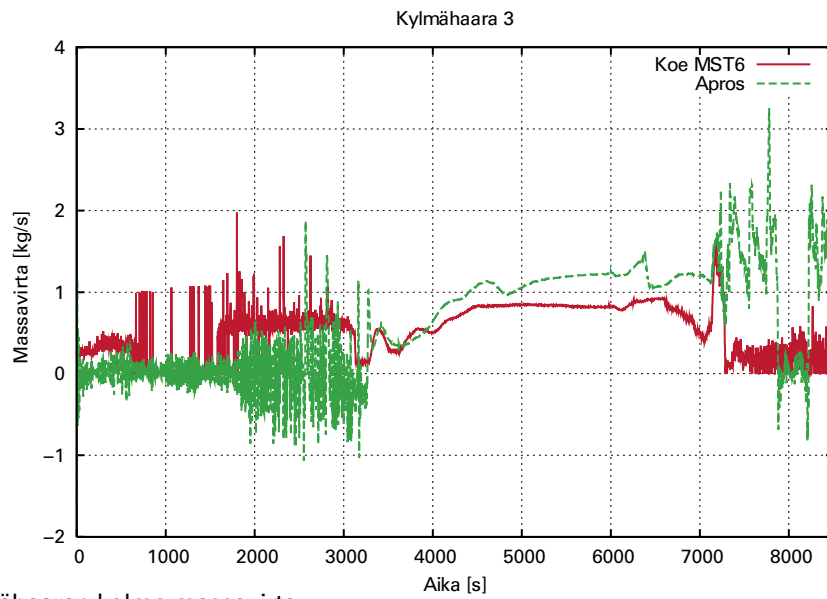
Kuva 21. Primääripiirin kokonaisvesimäärä ja hätäjähdytysvesien massavirta.



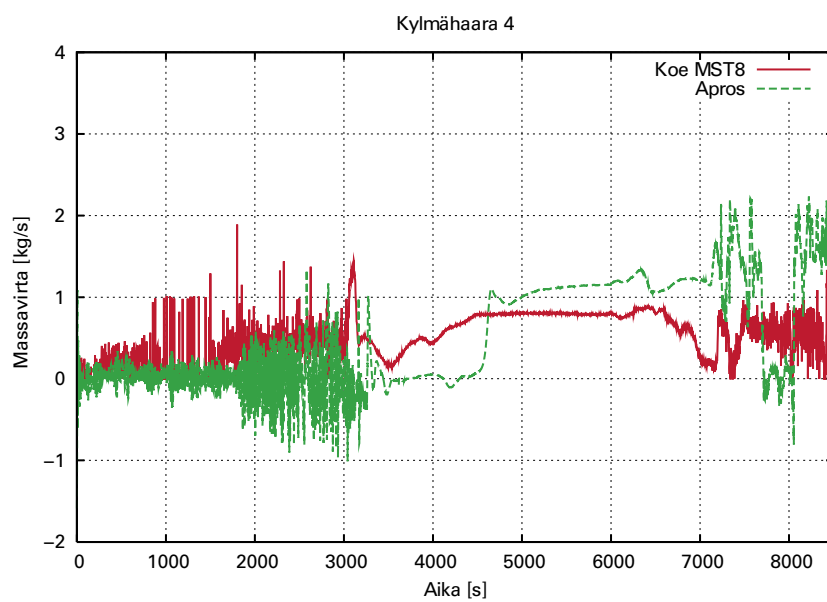
Kuva 22. Kylmähaaran yksi massavirta.



Kuva 23. Kylmähaaran kaksi massavirta.



Kuva 24. Kylmähaaran kolme massavirta.

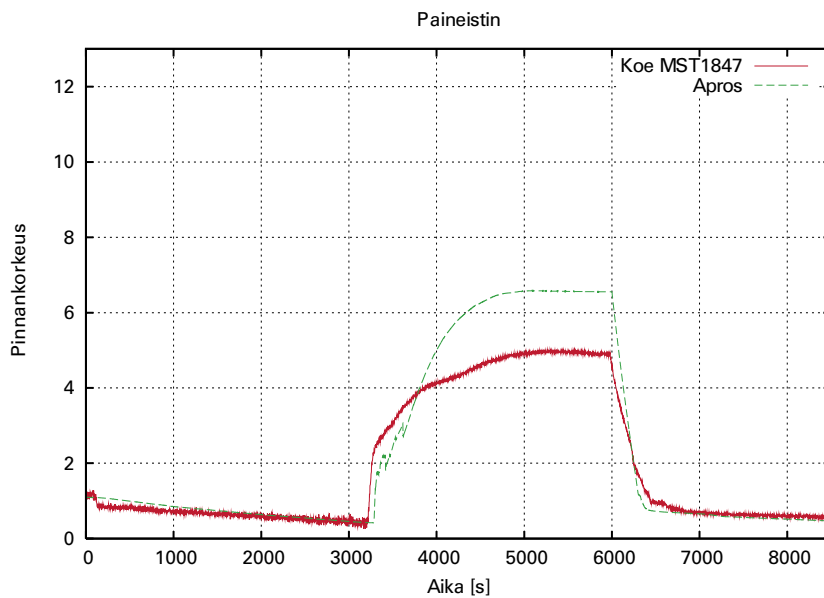


Kuva 25. Kylmähaaran neljä massavirta.

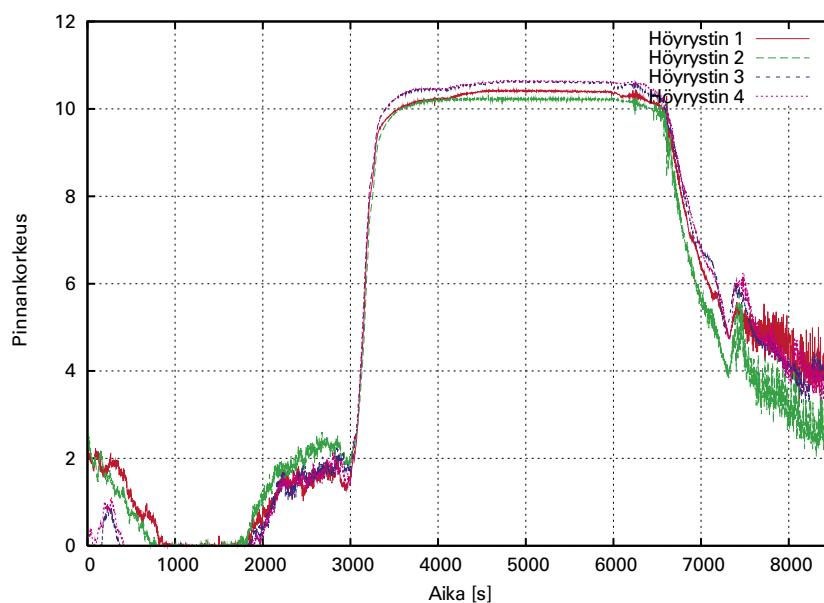
6.3.2 Pinnankorkeudet

Paineistimen pinnankorkeus on kokeen alussa 1,1 metriä ja se laskee tasaisesti siihen saakka, kunnes primääripiirin paine alkaa nousta matalapainehäätäjähdystyksen syötön vaikutuksesta. Pinnankorkeus vakiintuu noin kuuden ja puolen metrin paikkeille ja lähtee taas laskuun, kun korkeapainehäätäjähdystyksen syöttö lopetetaan.

Pinnankorkeus nousee simuloinnissa mitattua tapausta korkeammaksi. Paineistimen pinnankorkeus jatkaa nousuaan kunnes muu primääripiiri on täynnä vettä. Liitteen kuvasta 28 nähdään, että reaktorin ylätila on täyttynyt samaan aikaan, kun paineistimen pinnankorkeus vakiintuu. Paineistimen pinnankorkeus ja paine nousee korkeammaksi simuloinnissa, koska simuloinnissa primääripiiri-



Kuva 26. Paineistimen pinnankorkeus.



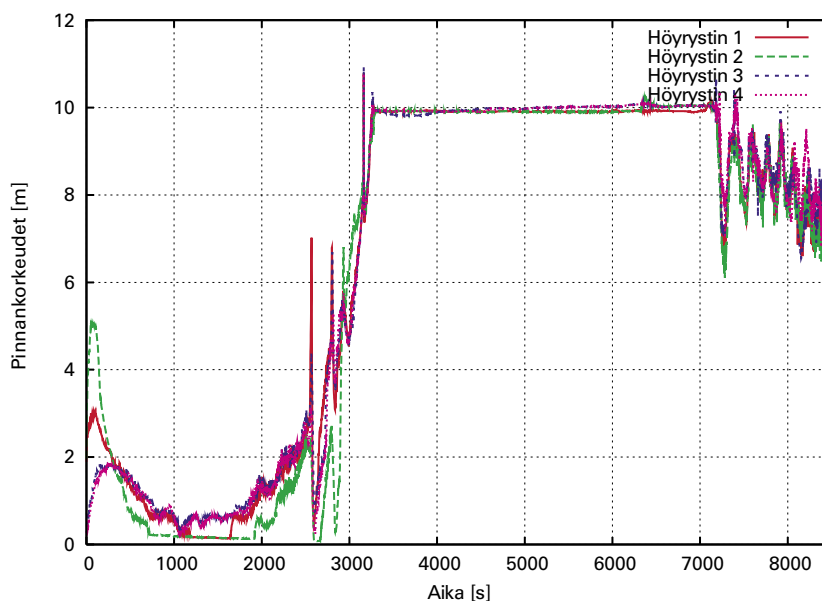
Kuva 27. Höyrystimen pisimmän putken sisäänmenon pinnankorkeudet koelaitteistossa.

rissä on enemmän vettä (kuva 21). Paineistimen pinnankorkeus ajan funktiona sekä mittauksista että Apro-simuloinnista on esitetty kuvassa 26.

Kuvassa 27 on esitetty kokeen mittaustulokset höyrystimien pisimmän putken pinnankorkeuksista ja kuvassa 28 laskentatulokset höyrystimien pisimmän putkiryhmän pinnankorkeuksista höyrystimien sisäänmenopuolella. Kuvasta 28 nähdään, että veden pinnankorkeudet höyrystinputkissa kokeen alussa ovat olleet höyrystimissä yksi ja kaksi noin kahden metrin korkeudella. Höyrystimien kolme ja neljä sisäänmenoissa vettä ei ole ollut juuri ollenkaan. Mallin alkutilanteessa höyrystinputkien pinnankorkeudet ovat olleet oikein, mutta piirin kaksi höyrystinputkien pinnankorkeus lähtee aluksi rajusti nousemaan. Lisäksi mallissa pinnankorkeuden erot pyrkivät tasoittumaan nopeasti eli

piireissä yksi ja kaksi korkeammalla oleva vesi valuu piireihin kolme ja neljä reaktorin ylätilan kautta. Apro-malliin ei saatu luotua kokeen alkutilassa havaittua epätasaista veden jakaumaa, koska veden jakauma pyrki tasoittumaan nopeasti.

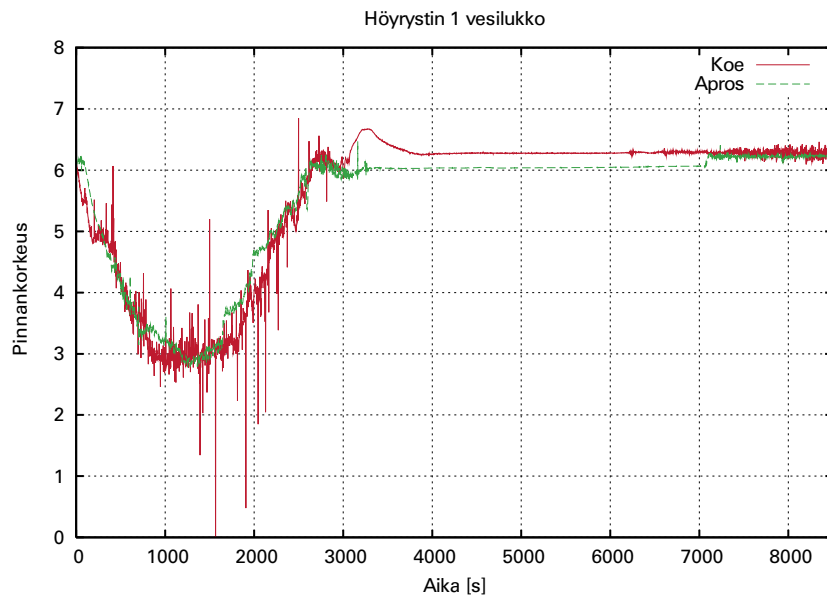
Koelaitteistossa pisimmän ja lyhimmän putken virtauksissa ei ollut suuria eroja, mutta lyhimät putket täyttyivät hieman aikaisemmin. Apro-mallissa pisin putkiryhmä täyttyi huomattavasti nopeammin kuin lyhyemmät, tämä näkyy selvästi liitteen 1 kuvista. Höyrystinkomponentissa putket oli jaettu siten, että pisimmässä ryhmässä oli kuusi putkea, keskimmaisessä 11 ja lyhimässä 11 putkea. Mallia testattiin myös putkijaoilla 9-9-10 ja 2-20-6. Kaikilla putkijaoilla taipumuksena oli se, että pisimmässä putkiryhmässä pinnankorkeus nousi nopeimmin.



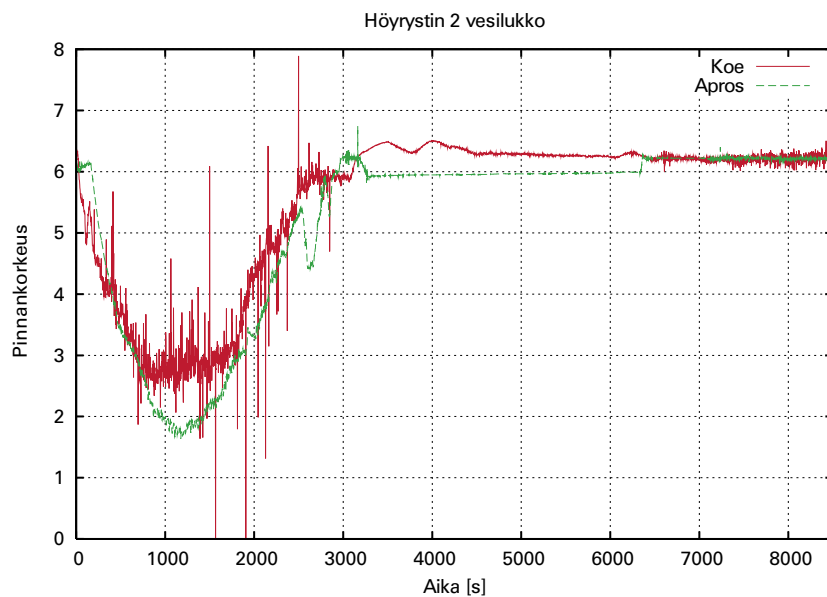
Kuva 28. Höyrystimen pisimmän putkiryhmän sisäänmenon pinnankorkeudet Apro-simulointimallissa.

Kokeen alussa pinnankorkeudet myös vesilukkoissa olivat eri korkeudella eri piireissä. Myös näiden pinnankorkeuksien eri korkeudelle saaminen kokeen alussa oli hankalaa, koska pinnankorkeu-

den erot pyrkivät tasoittumaan. Kuvista 29–32 nähdään vesilukkojen höyrystimen kylmäkolektorin puoleisen osan pinnankorkeudet. Näissä kuvissa luonnonkierron liikkeellelähtö näkyy pinnankor-



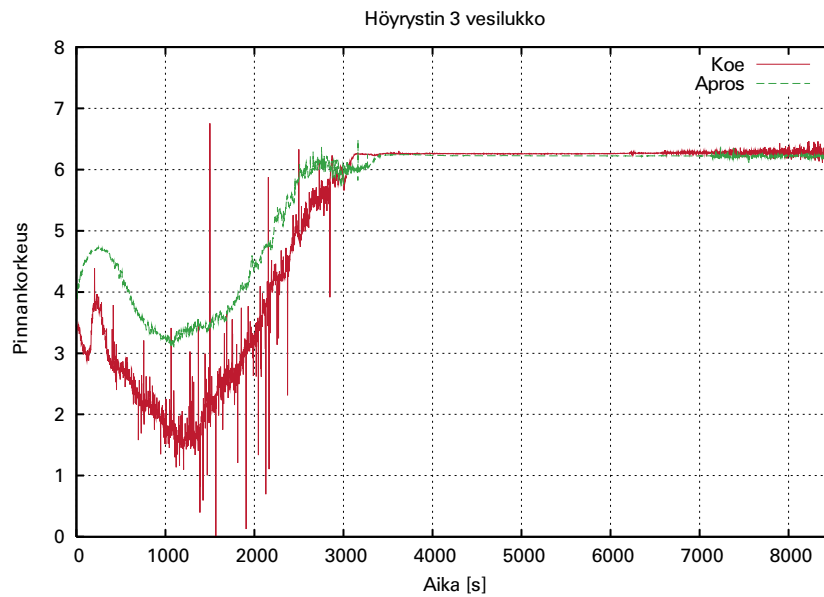
Kuva 29. Piirin yksi vesilukon pinnankorkeus.



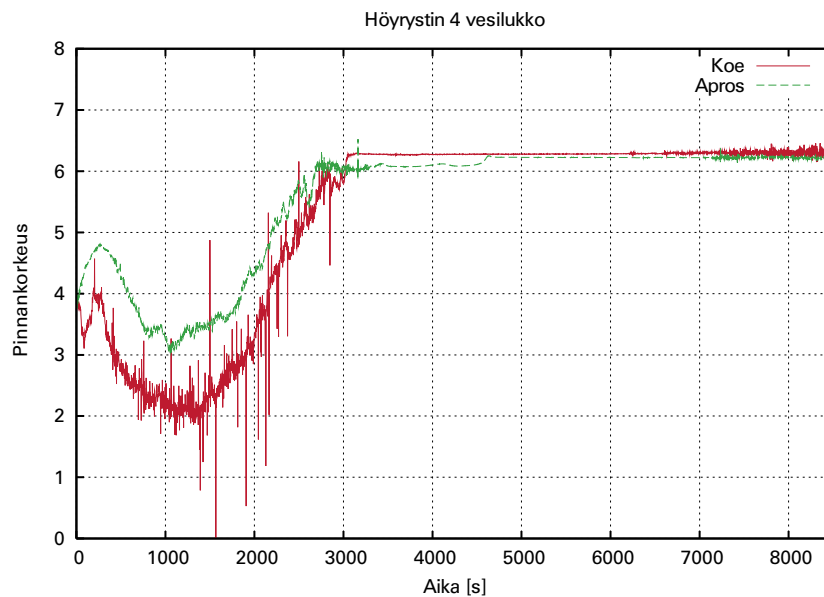
Kuva 30. Piirin kaksi vesilukon pinnankorkeus.

keuden nousemisena maksimiarvoonsa. Kuvista huomataan, että piirien kolme ja neljä vesilukoissa on ollut liikaa vettä. Jos vettä olisi vähentänyt alkutilassa, olisi myös primääripiirin kokonaisvesimäärä

pienentynyt. Mallin tilavuuksien oikeellisuus tulisikin vielä tarkistaa, todennäköisesti jossakin vesilukkoa alapuolella olevassa osassa tulisi olla hieman suurempi tilavuus.



Kuva 31. Piirin kolme vesilukon pinnankorkeus.

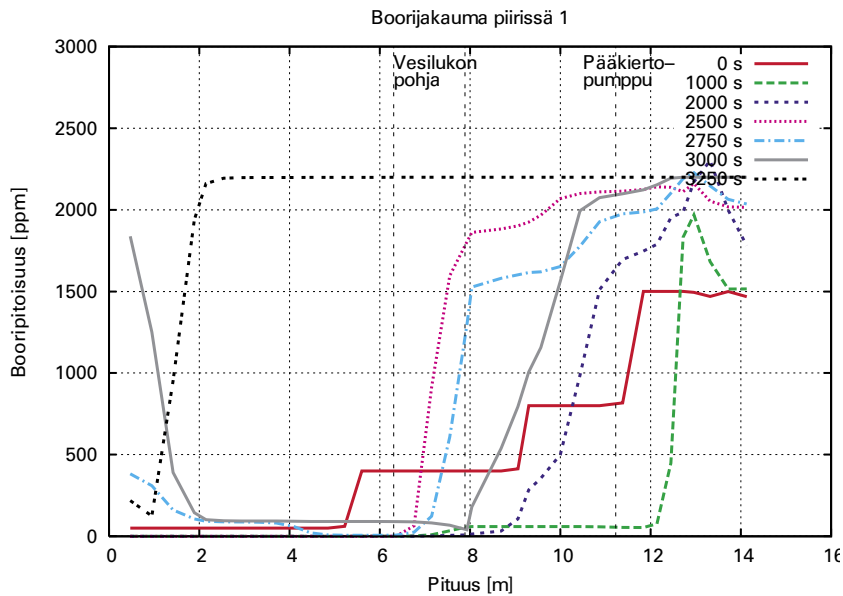


Kuva 32. Piirin neljä vesilukon pinnankorkeus.

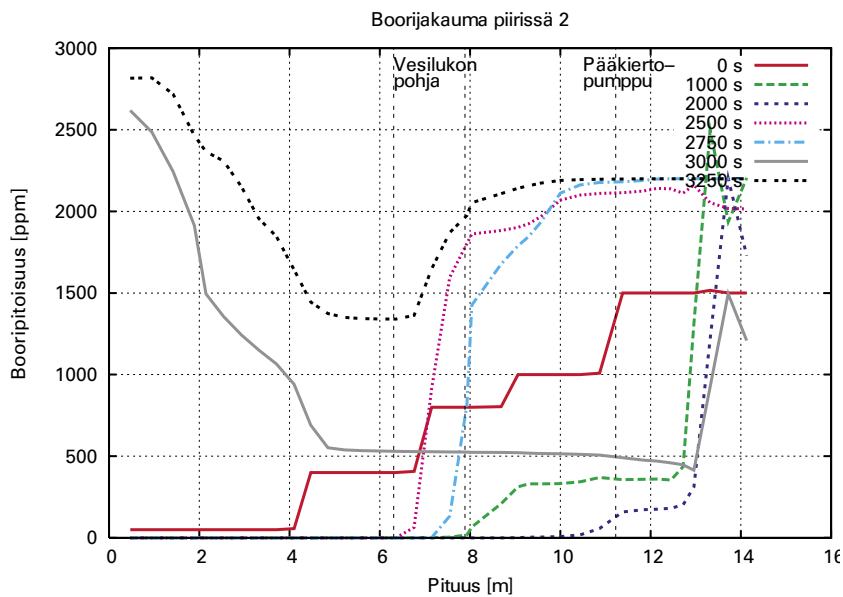
6.3.3 Booripitoisuudet

Apros-ohjelmassa booripitoisuuden ratkaisumenetelmiä on kaksi kappaletta, ensimmäisen ja toisen kertaluvun diskretointi [15]. Toisen kertaluvun ratkaisulla boorittoman veden tulppa saadaan etenemään teräväreunaisempana. Ratkaisumenetelmien eroja käsiteltiin enemmän kappaleessa 5.6. Booripitoisuuksien laskennassa toisen kertaluvun

ratkaisumenetelmää on käytetty vesilukoissa, kylmähaaroissa ja alasmenotilan putkissa. Muualla mallissa on käytössä ensimmäisen kertaluvun ratkaisu. Toisen kertaluvun ratkaisua ei voida käyttää sellaisissa paikoissa, joissa noodiin on kytketty enemmän kuin kaksi virtausyhdetä. Toisin sanoen toisen kertaluvun diskretointia ei voi käyttää virtauksen haaraumakohdissa.



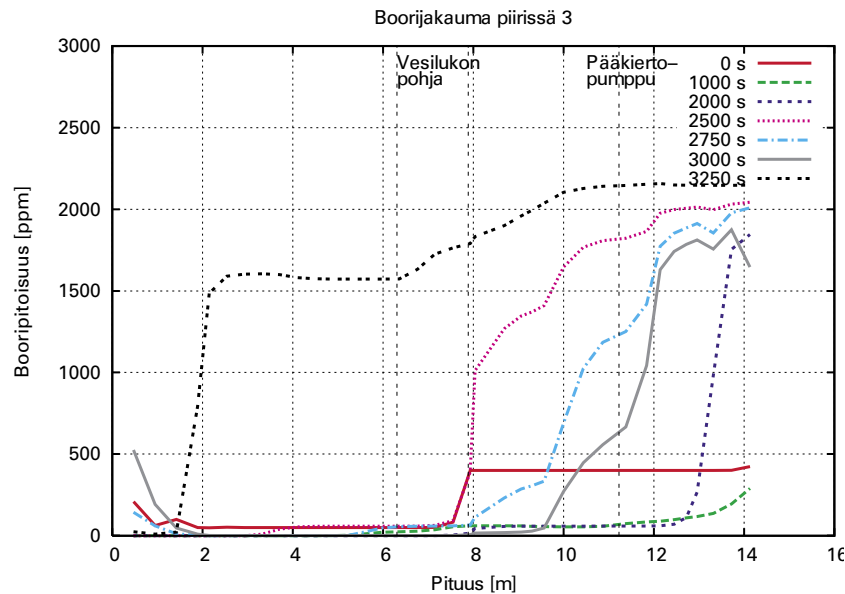
Kuva 33. Booripitoisuuden jakauma piirin yksi vesilukossa ja kylmähaarassa eri ajanhetkillä.



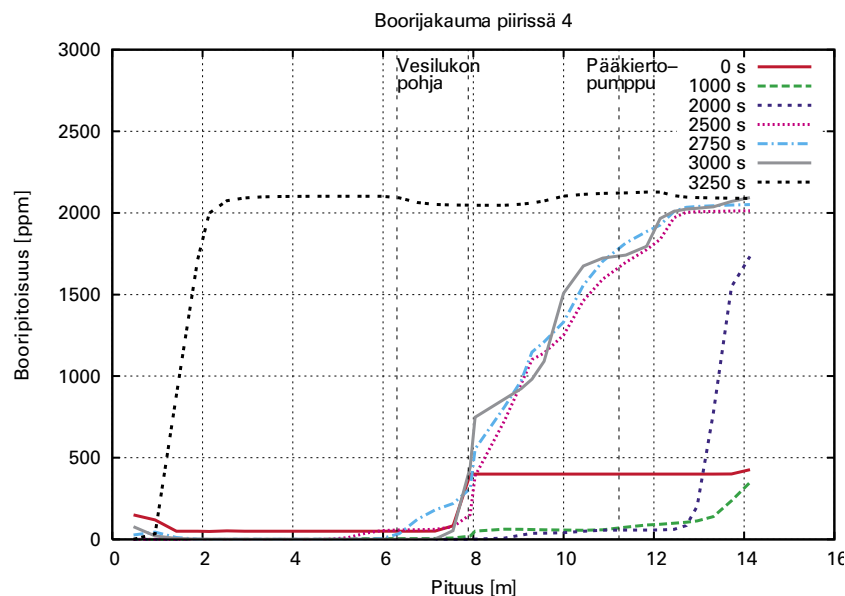
Kuva 34. Booripitoisuuden jakauma piirin kaksi vesilukossa ja kylmähaarassa eri ajanhetkillä.

Kuvissa 33–36 näkyy eri piirien booripitoisuuden jakaumat eri ajanhetkillä. X-akselilla oleva pituus tarkoittaa höyrystimen ja reaktoripaineastian sisääntulon yhdistävää putkea eli vesilukkoa ja kylmähaaraa. Arvo nolla x-akselilla on höyrystimen ulostulossa ja arvo 14 reaktoripaineastian sisäänmenossa. Boorittoman veden tulppa liikkuu aluksi kaikissa piireissä kohti reaktoripaineastiaa

(aikavälillä 0–2000 s), mutta myöhemmin ennen luonnonkiertoa tulppa painuu takaisin höyrystimeen päin. Tällöin osa boorittomasta vedestä nousee höyrystimen ulostulopuolen putkiin. Boorittoman veden ja korkeabooripitoisen veden raja myös jyrkkenee ennen luonnonkierron alkua. Tämä johtuu siitä, että kylmähaaroihin tulee piireihin yksi ja kaksi syötettävää korkeabooripitoista vettä.



Kuva 35. Booripitoisuuden jakauma piirin kolme vesilukossa ja kylmähaarassa eri ajanhetkillä.

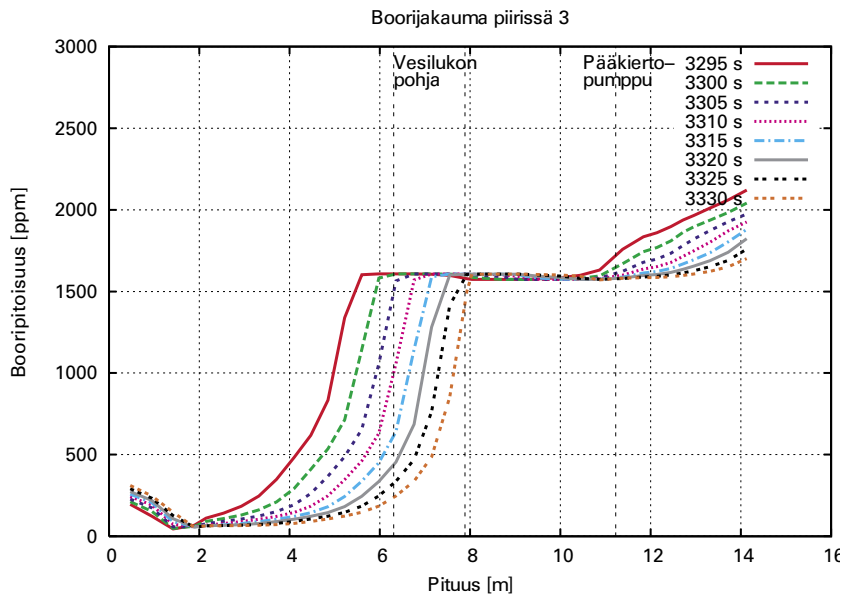


Kuva 36. Booripitoisuuden jakauma piirin neljä vesilukossa ja kylmähaarassa eri ajanhetkillä.

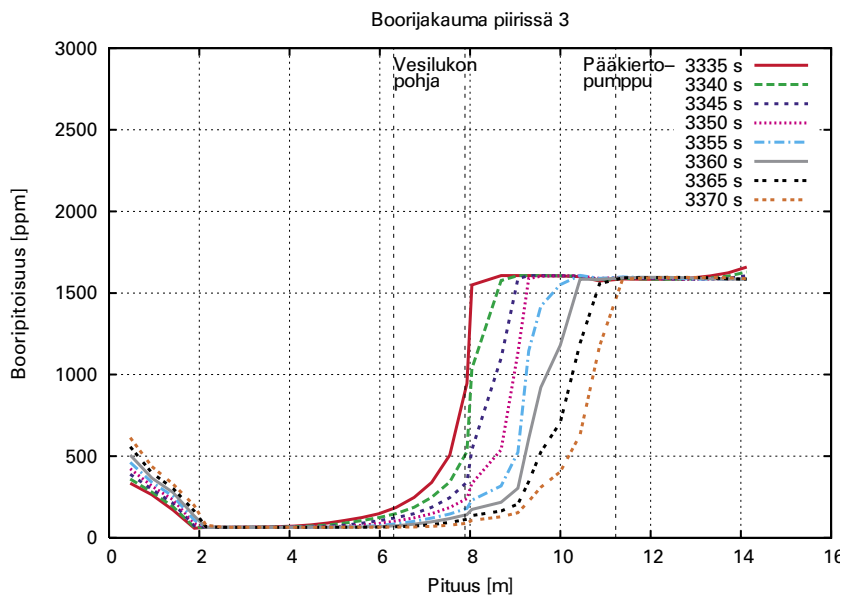
Osassa piiriä kaksi booripitoisuus on ajanhetkellä 3250 s niinkin suuri kuin 2800 ppm. Booripitoisuus väkevöityy reaktorin yläosassa, kun sieltä höyrystyy vettä. Ennen ajanhetkeä 3000 s piirissä kaksi

kiertänyt luonnonkierto on tuonut piiriin reaktorin yläosassa väkevöitynyttä vettä.

Kuvissa 37–40 on esitetty tarkemmin piirin kolme boorittoman tulpan liikkeellelähtö. Booripitoi-



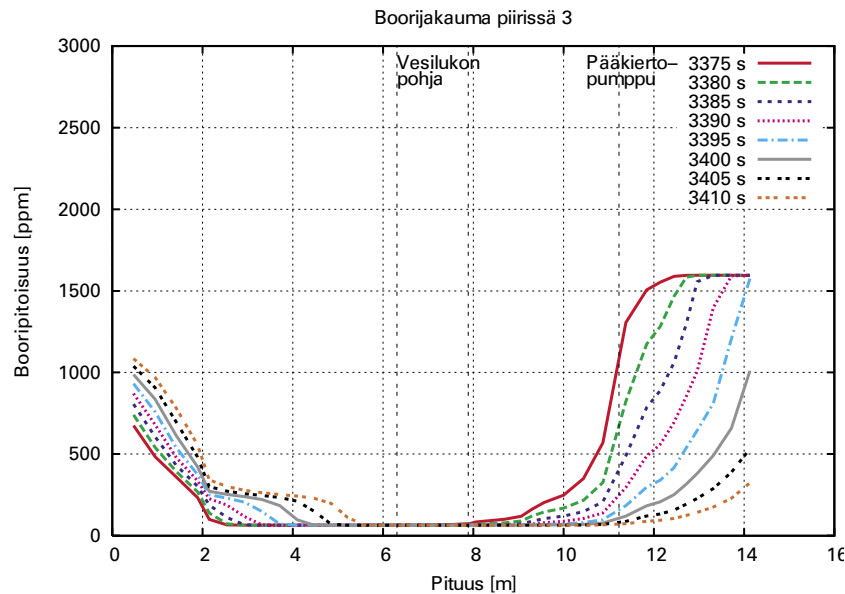
Kuva 37. Booripitoisuus piirin kolme vesilukossa ja kylmähaarassa ajanhetkillä 3295–3330 s.



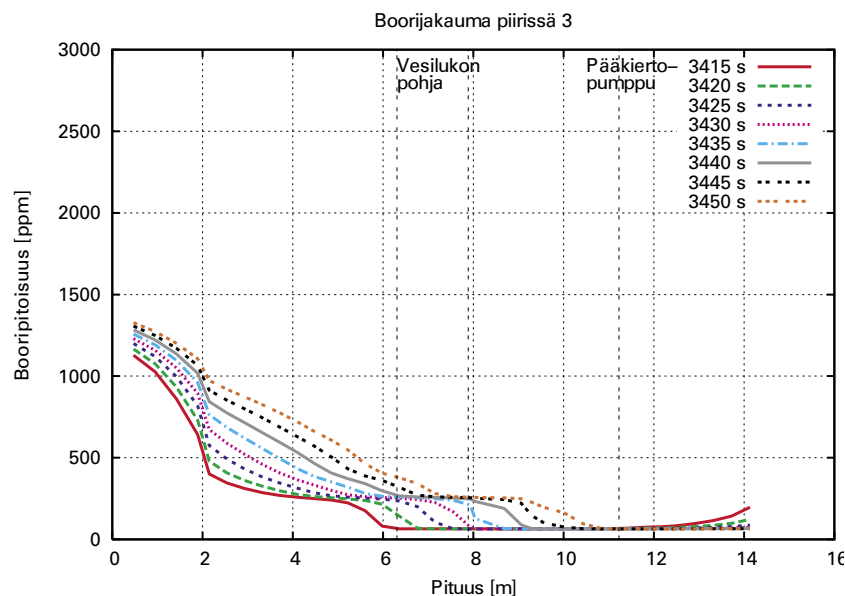
Kuva 38. Booripitoisuus piirin kolme vesilukossa ja kylmähaarassa ajanhetkillä 3335–3370 s.

suudet on esitetty aikaväliltä 3295–3450 sekuntia viiden sekunnin välein. Ennen kuin luonnonkierto lähtee liikkeelle, on boorittoman veden tulppa noussut höyrystimeen. Alasmenokammion kautta pääsee piiriin kolme virtaamaan kylmähaaroihin

yksi ja kaksi syötettävää hätäjähdytysvettä, joka painaa boorittoman veden tulpan höyrystimeen. Kuvista nähdään, että tulpan muoto säilyy suurin piirtein samanlaisena.



Kuva 39. Booripitoisuus piirin kolme vesilukossa ja kylmähaarassa ajanhetkillä 3375–3410 s.

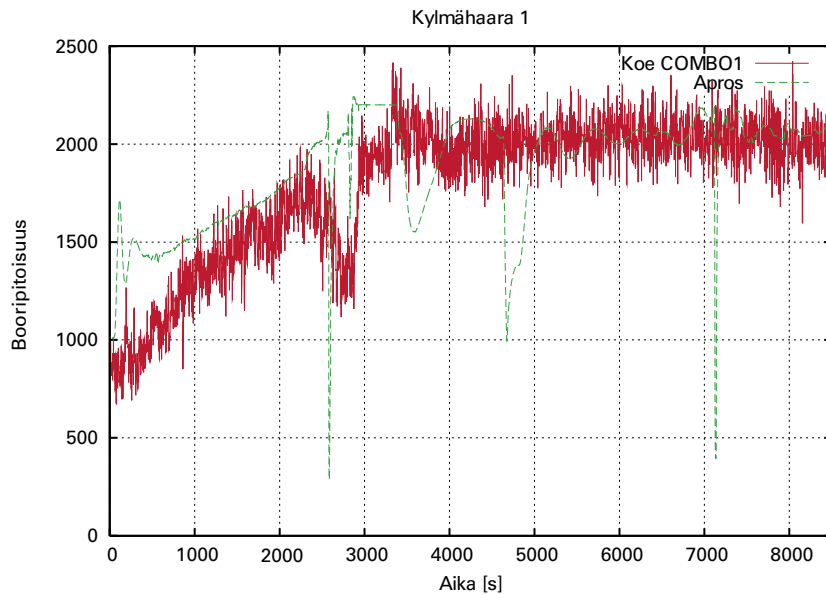


Kuva 40. Booripitoisuus piirin kolme vesilukossa ja kylmähaarassa ajanhetkillä 3415–3450 s.

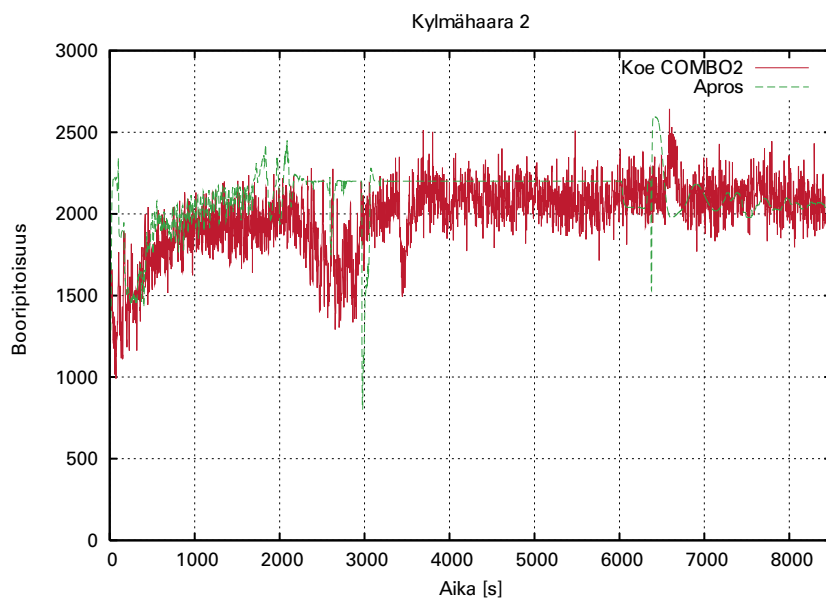
Kuvissa 41–44 esitetyt booripitoisuudet on mitattu pisteestä, jossa kylmähaara liittyy alasmenotilaan. Koelaitteiston booripitoisuudet on mitattu vastaavasta kohdasta. Kylmähaaroissa kolme ja neljä booripitoisuus pysyy kauimmin alhaisimpana, koska niihin ei syötetä hätäjähdytysvettä ja niiden booripitoisuus kokeen alkuhetkellä on pienin. Kylmähaaraan yksi syötettävä hätäjähdytysvesi menee suurimmaksi osaksi suoraan vuodosta ulos. Hätäjähdytysveden booripitoisuus on 2200 ppm. Kylmähaaroissa yksi ja kaksi alkuvaiheessa tapahtuva booripitoisuuden nousu johtuu juuri hä-

täjähdytysveden syötöstä ja tämä vesi pääsee virtaamaan myös kylmähaarioihin kolme ja neljä alasmenotilan kammion kautta. Koska Aprosmallissa booripitoisuus on alussa suurempi, näyttäisi siltä, että mallissa alasmenotilan kammion kautta pääsee virtaamaan vettä kylmähaarioihin kolme ja neljä enemmän kuin koelaitteistossa. Mallin alkutilanteessa on myös ollut asetettuna liian korkeat booripitoisuudet kylmähaarioihin kolme ja neljä.

Aprosmallissa piirissä yksi tapahtuu jo 2600 sekunnin paikkeilla suuri booripitoisuuden alenema, jolloin osa boorittoman veden tulpasta saapuu



Kuva 41. Booripitoisuus kylmähaarassa yksi.

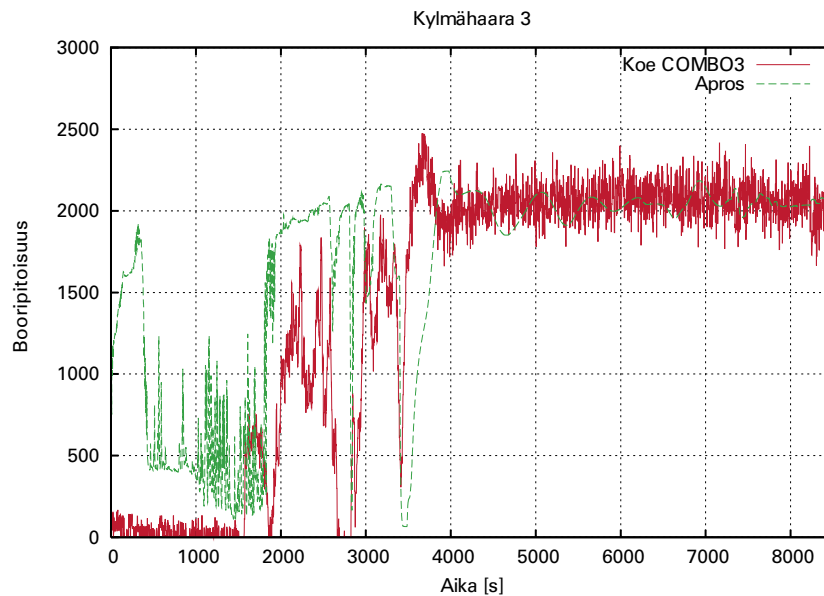


Kuva 42. Booripitoisuus kylmähaarassa kaksi.

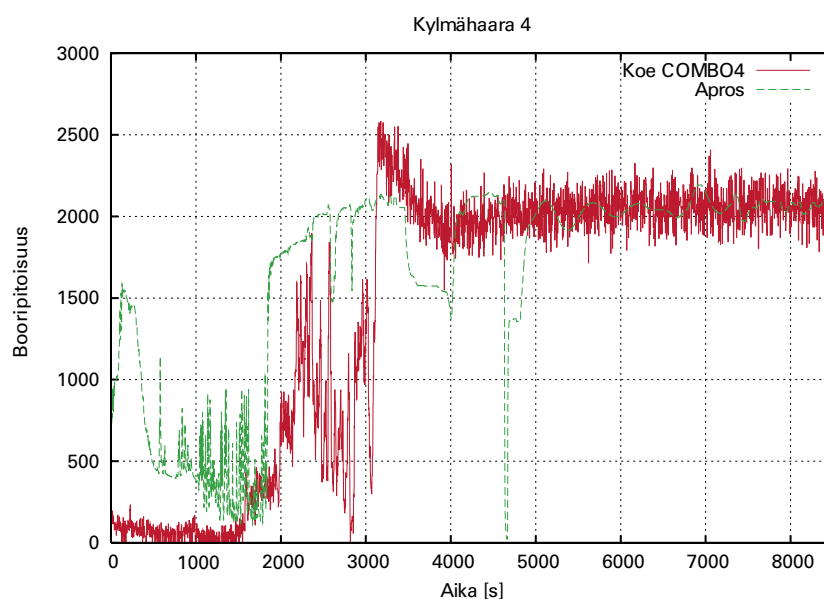
reaktoripaineastiaan. Booripitoisuus laskee mittauspisteessä alimmillaan vajaan 300 ppm. Tällöin tässä piirissä on ollut luonnonkiertoa, mutta se on kuitenkin kestänyt vain reilun parikymmentä sekuntia. Kokeessa piirin yksi boorittoman veden tulppa poistui kylmähaarassa olevasta vuodosta kokonaisuudessaan eikä reaktoripaineastian sisääntulossa ollut mitattavaa booripitoisuuden alenemista. Apros-mallissa ainakin osa boorittoman veden tulpasta saapuu reaktoripaineastiaan ja booripitoisuus käy noin 400:ssä ppm luonnonkierron alkaessa, kuten kuvasta 39 huomataan.

Piirin kaksi boorittoman veden tulppa saapuu reaktoripaineastiaan, kun luonnonkierto lähtee ensimmäisen kerran liikkeelle ajanhetkellä 2931 s. Tällöin booripitoisuus käy alimmillaan noin 800:ssä ppm. Toisen kerran luonnonkierto lähtee liikkeelle 6000 sekunnin jälkeen, jolloin piirissä ei ole enää booritonta vettä.

Apros-mallissa piirissä neljä booripitoisuuden aleneminen alkaa samoihin aikoihin kuin luonnonkiertokin lähtee liikkeelle kyseisessä piirissä ajanhetkellä 4300 sekuntia. Booripitoisuus laskee alimmillaan noin 20:een ppm. Tämä piirin neljä



Kuva 43. Booripitoisuus kylmähaarassa kolme.

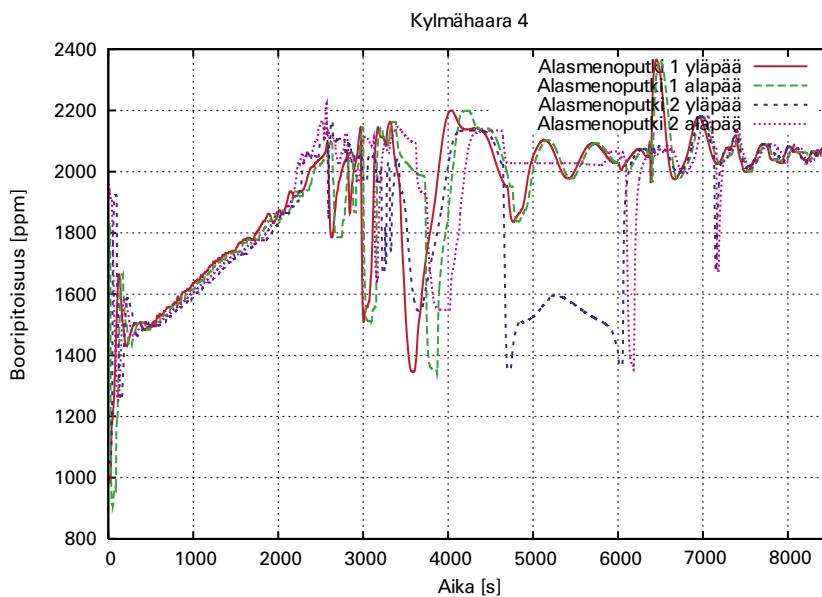


Kuva 44. Booripitoisuus kylmähaarassa neljä.

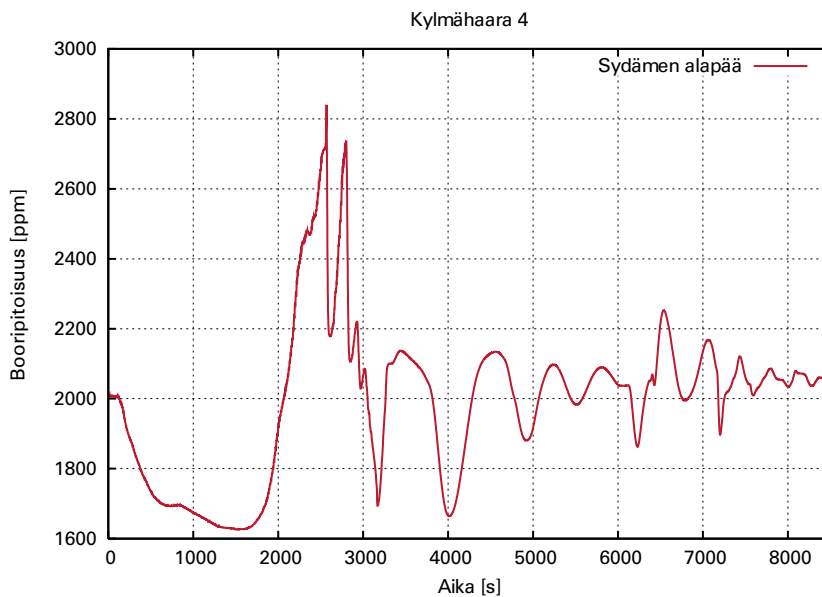
boorittoman veden tulpan liikkeelle lähtö näkyy myös piirin yksi booripitoisuuden alenemisena. Vesi pääsee virtaamaan piiristä toiseen alasmenotilan kammion kautta.

Piirin kolme booripitoisuus käy 65:ssa ppm luonnonkierron alkaessa. Piirien kolme ja neljä mittaustulokset eivät ole luotettavat ennen kolmea tuhatta sekuntia, koska kylmähaaran putket eivät ole olleet täynnä vettä. Reaktoripaineastian sisäänmenossa kokeessa booripitoisuus putosi pienimmillään 350 ± 100 ppm, Apros-simuloinnissa pitoisuus sisäänmenossa kävi pienimmillään arvossa 20 ppm ajanhetkellä 2560 s.

Alasmenoputkien booripitoisuus kokeen alkutilanteessa oli noin 1000 ppm ja reaktorisydämen booripitoisuus noin 2000 ppm. Kuvasta 46 nähdään, että sydämen booripitoisuus käy alhaisimmillaan, kun alussa alasmenotilassa 1000 ppm:ksi asetettu vesi tulee sydämeen. Alasmenoputkien yläosassa (kuva 45) booripitoisuus käy alhaisimmillaan noin 1350:ssa ppm, kun piirin kolme boorittoman veden tulppa lähtee liikkeelle. Reaktorisydämessä yli 2800:een ppm väkevöitynyt vesi laimenee tällöin noin 1700 ppm:n booripitoisuuteen. Tämän jälkeen sydämen booripitoisuudessa ei näy huomattavaa



Kuva 45. Apros-mallin booripitoisuus alasmenoputkissa.



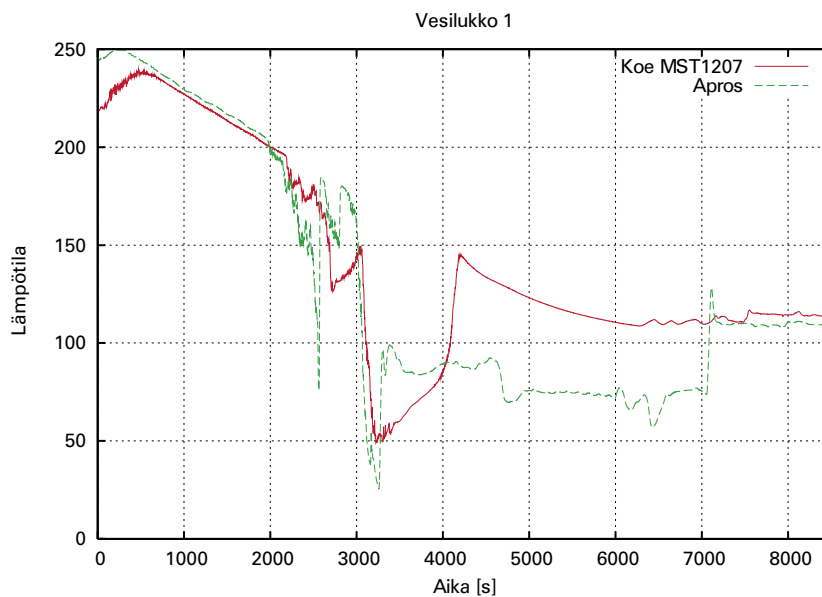
Kuva 46. Apros-mallin booripitoisuus reaktorisydämen alaosassa.

alenemista. Se ettei sydämen booripitoisuus laske, selittyy sillä, että alasmienotilan kammiossa tapahtuu kiertovirtausta, joka sekoittaa booripitoisuutta tehokkaasti. Lisäksi alasmienoputkissa tapahtuu kiertovirtausta, joka myös sekoittaa booripitoisuuksia ja näin boorittoman veden tulpat eivät pääse sekoittumattomina reaktorisydämeen saakka. Kiertovirtaus näkyy kuvasta 17. Lisäksi alasmienotilan kammion noodeja yhdistävissä virtaushaara komponenteissa on käytössä ensimmäisen kertaluvun ratkaisumenetelmä ratkaistaessa boorikonentraatioita, mikä voi aiheuttaa booripitoisuuden muutosta. Alasmienoputkien ja sydämen booripitoisuutta ei ole verrattu koetuloksiin, koska

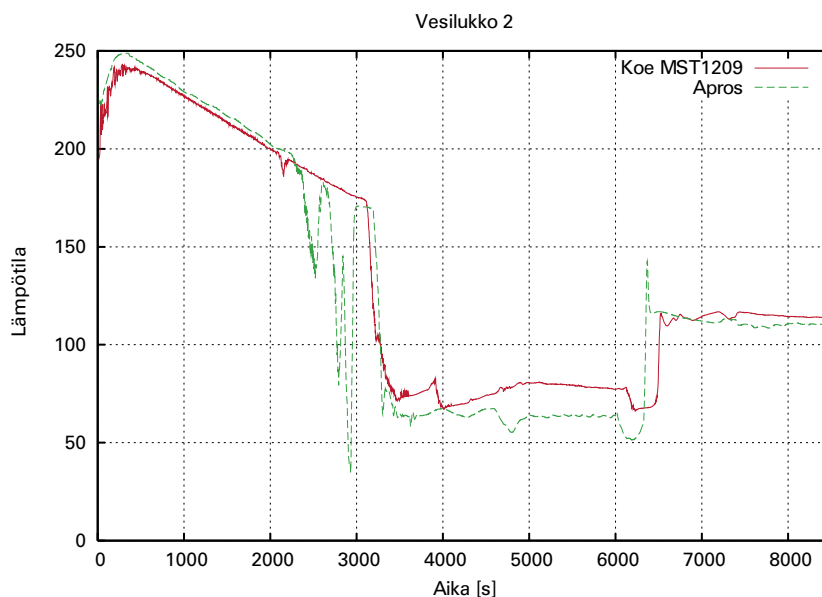
koelaitteistossa ei ollut näissä kohti jatkuvaa booripitoisuuden mittausta, vaan näistä pisteistä otettiin näytteet muutamana ajanhetkenä.

6.3.4 Vesilukkojen lämpötilat

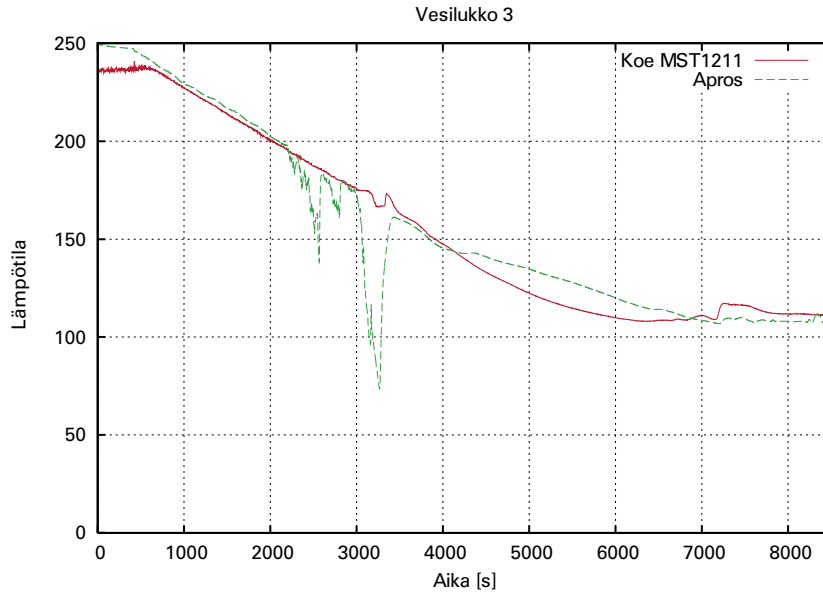
Kuvissa 47–50 on verrattu koelaitteiston ja simulointimallin vesilukkojen lämpötiloja. Lämpötilakuvat tukevat jo aikaisemmin esitettyä ilmiötä, eli simulointimallissa kylmähaaroihin yksi ja kaksi syötettävä hätjäjäähdytysvesi virtaa alasmienokammion kautta kylmähaaroihin kolme ja neljä. Vesilukoissa kolme ja neljä (kuvat 49 ja 50) lämpötila laskee huomattavasti alemmaksi kuin koelaitteistossa ennen luonnonkierron alkua.



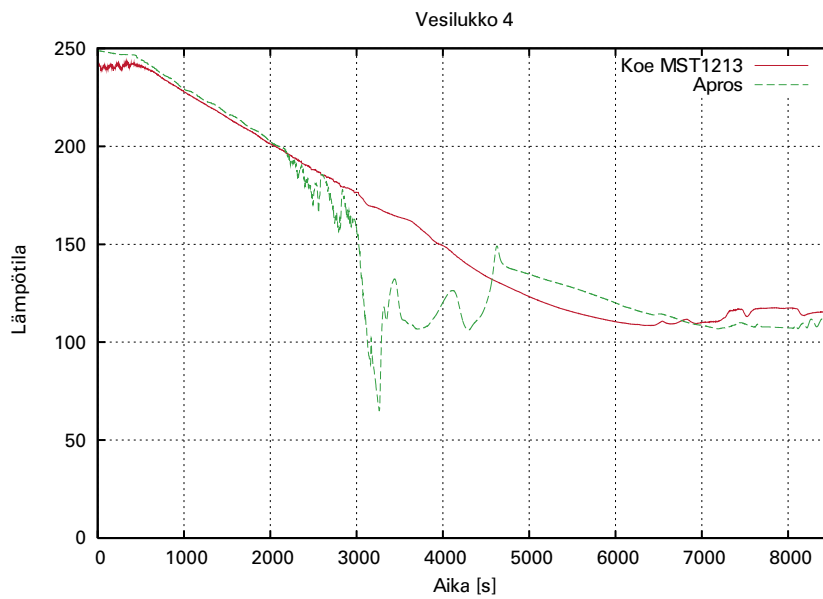
Kuva 47. Lämpötila pääkiertopiiriin yksi vesilukon pohjalta.



Kuva 48. Lämpötila pääkiertopiiriin kaksi vesilukon pohjalta.



Kuva 49. Lämpötila pääkiertopiirin kolme vesilukon pohjalta.



Kuva 50. Lämpötila pääkiertopiirin neljä vesilukon pohjalta.

7 Yhteenveto ja johtopäätökset

Simulointimallin teko PKL-koelaitteistosta Apros Grades simulointiohjelmalla onnistui varsin hyvin. Työn tavoitteena oli selvittää kuinka hyvin simulointimallilla saadut tulokset vastaavat mittaustuloksia. Simulointitulokset noudattelevat pääpiirteiltään mittaustuloksia ja simuloinnissa oli havaittavissa kaikki ilmiöt mitkä kokeessakin tapahtuivat. Tavoitteena ei siis ollut saada samoja tuloksia, sillä mittaustuloksissakin on mittausvirhettä ja laskemalla saadut tulokset riippuvat myös muusta kuin siitä miten hyvin malli vastaa koelaitteistoa. Laskemalla saatuihin tuloksiin vaikuttavat myös laskennassa käytettävä aika-askel ja iterointien määrä. Mitä pienempi aika-askel ja mitä enemmän iterointeja suoritetaan, sitä tarkemmat tulokset saavutetaan. Haittana tässä on laskennan hidastuminen. Laskennassa käytettiin maksimi aika-askeleena 0,03 s ja minimi iterointien määrä oli kolme. Näillä arvoilla kokeen läpi laskeminen kesti noin 18 tuntia. Tarkempiin tuloksiin päästään myös tihentämällä nooditusta, kuten huomattiin mallinnettaessa yksi vesilukko ja kylmähaara.

Simulointimallilla laskettiin vain yksi koe. Mallilla tulisi laskea vielä toisen tyyppisiä kokeita, ennen kuin voidaan sanoa varmuudella kuinka hyvä malli on. Mallilla olisi hyvä laskea sellainen koe, joka alkaa stationääritilasta. Mallilla nyt laskettu pienen vuodon koe ei alkanut stationääritilasta ja tästä johtuen alkutilan asettamisessa olikin ongelmia. Luonnonkierron alkuun vaikuttavien höyrystinputkien pinnankorkeuksien, lämpötilajakautumien ja paine-erojen saaminen samaksi kuin koelaitteistossa kokeen alkuhetkellä oli ollut, oli hankalaa. Mallilla olisi hyvä suorittaa myös herkkyystarkastelu sellaisella kokeella, joka alkaa stationääritilasta. Tällä pienen vuodon kokeella herkkyystarkastelua oli vaikea suorittaa, johtuen alkutilasta. Kun koe simuloitiin samoilla alkuarvoilla kaksi kertaa peräkkäin, niin tulokset

saattoivat poiketa toisistaan varsinkin luonnonkiertojen alkuhetkien osalta.

Kehitettävää ja paranneltavaa mallista vielä kuitenkin löytyy. Mallin ja koelaitteiston vesitilavuudessa oli prosentuaalisesti hyvin pieni ero. Mallin tilavuus oli 5,4 % suurempi kuin koelaitteiston. Pienen vuodon koetta simuloidessa kävi kuitenkin ilmi, että luonnonkiertojen liikkeelle lähtöön vaikuttaa hyvin paljon se, kuinka paljon vettä primääripiirissä on ja kuinka vesi on jakautunut. Eri osien tilavuudet tulisikin vielä tarkastaa. Mallin lämpöhäviöt vastasivat hyvin koelaitteiston lämpöhäviöitä 250 °C lämpötilassa, mutta 150 °C lämpötilassa häviöt olivat liian suuria, joten tähän tulee kiinnittää huomiota mallin jatkokehityksessä. Painehäviöt vastasivat hyvin mittaustuloksia massavirralla 23,5 kg/s. Painehäviöt olisi kuitenkin jatkossa hyvä tarkistaa myös pienemmällä massavirralla, koska useimmat mallilla suoritettavat kokeetkin tullaan suorittamaan pienemmällä massavirralla.

Yksi jatkokehittelyä mallissa mahdollisesti vaativa paikka on alaschenokammion nooditus. Alaschenokammion nooditus vaikuttaa paljon siihen, kuinka kylmästä haarasta tuleva boorittoman veden tulppa sekoittuu booripitoisempaan veteen. Ydinvoimalaitoksen alaschenotilan olisikin syytä olla rakenteeltaan sellainen, että mahdollinen boorittoman veden tulppa sekoittuisi tarpeeksi hyvin. Koelaitteiston putkimallinen alaschenotila ei ole paras mahdollinen ratkaisu, kun tutkitaan boorittoman veden tulpan sekoittumista booripitoisempaan veteen. Jos haluttaisiin tarkastella booripitoisuuden muutoksia reaktori sydämen sisääntulossa, niin silloin alaschenoputket olisi hyvä mallintaa yhtenä putkena tai rengasmaisena kanavana oikean reaktorin tapaan. Näin estettäisiin nyt mallin alaschenoputkissa tapahtuva booripitoisuuksia sekoittava kiertovirtaus.

Apros-ohjelmaan konsentraatiomuutosten laskentaan kehitetty toisen kertaluvun diskretointi näyttää toimivan hyvin, kun lasketaan booripitoisuuden muutoksia. Käyttämällä tätä toisen kertaluvun ratkaisua saadaan kylmähaarassa liikkuva boorittoman veden tulppa pysymään jyrkkäreunaisena. Laskettaessa aikaisemmin käytetyllä ensimmäisen kertaluvun ratkaisulla pyrkivät booripitoisuuden erot tasoittumaan.

Erot simulointi- ja koetulosten välillä johtu-

vat simulointimallin geometrian eroista ja epätarkkuuksista. On kuitenkin muistettava, että kolmiulotteisten kanavien mallintaminen tasoon on hankalaa ja joudutaan tekemään yksinkertaistuksia. Myös paine- ja lämpöhäviöiden erot vaikuttavat tuloksiin. Apros-ohjelma on kehitetty ydinvoimalaitosten turvallisuustarkasteluja varten ja tässä suoritettu laskenta antaa lisävarmuutta Apros-soveltuvuudesta ydinvoimalaitosten mallinnukseen.

Lähdeluettelo

- [1] Wegner. RELAP5/Mod3 Input Model for the PKL III test facility. Framatome ANP 2002. 0600114220. 20 s.
- [2] Saastamoinen, Jaakko. Reaktoritekniikan perusteet. Espoo, Otakustantamo 4. muuttamaton painos. 1971. ISBN 951-671-097-2. 197 s.
- [3] Ohje YVL 1.0, Ydinvoimalaitosten suunnittelussa noudatettavat turvallisuusperiaatteet. Saatavissa: http://www.stuk.fi/julkaisut_maa-raykset/viranomaisohjeet/fi_FI/yvl/ Viitattu: 5.4.2005.
- [4] Tuomisto, Harri. Perspectives on boron dilution. OECD/CSNI Specialist Meeting on Boron Dilution Reactivity Transients, State College, Pennsylvania, USA, 18–20 October 1995. IVO International Ltd, Vantaa. 1995. S. 37–48.
- [5] Attard, Anthony. Boron Dilution Reactivity, An Overview of Efforts. OECD/CSNI Specialist Meeting on Boron Dilution Reactivity Transients, State College, Pennsylvania, USA, 18–20 October 1995. Office of Nuclear Reactor Regulation, United States Nuclear Regulatory Commission 1995. S. 63–74.
- [6] Kremin, H., Limprecht, H., Güneysu, R., Umminger, K. Description of the PKL III Test Facility. Technical Center of Framatome ANP Erlangen, Germany. 2001. 79 s.
- [7] Pershagen, Bengt. Light Water Reactor Safety. Studsvik AB, Nyköping, Sweden, Pergamon Press. 1989. ISBN 0-08-035915-9. 467 s.
- [8] Mull, Thomas. Test PKL III E2.2: Inherent Boron Dilution during SB-LOCA, Test Report. Framatome ANP, Erlangen, Germany. 2002. 47 s.
- [9] Aprosohjelman käyttöohjeet.
- [10] Ylijoki, Jukka. Aproso Model of the Steam Generator of an EPR Plant. Research report, VTT Processes, Pulp and Paper Industry 2004. PRO5-0042T-04. 16 s.
- [11] Kremin, H., Limprecht, H., Güneysu, R. Determination of Individual Volumes and of Total Volume in the PKL Test Facility. Technical Center of Framatome ANP Erlangen, Germany. 2001. 58 s.
- [12] Kremin, H., Limprecht, H., Güneysu, R. Determination of Thermal Losses in the PKL Test Facility. Technical Center of Framatome ANP Erlangen, Germany. 2001. 37 s.
- [13] Ryti, Henrik. Tekniikan käsikirja 2. Jyväskylä, K.J. Gummerus osakeyhtiö, kahdeksas uusittu ja lisätty painos. 1967. 778 s.
- [14] Kremin, H., Limprecht, H., Güneysu, R. Determination of Pressure Losses in the PKL Test Facility. Technical Center of Framatome ANP Erlangen, Germany. 2001. 10 s.
- [15] Ylijoki, Jukka. Simulation of Sharp Concentration Changes in Aproso. Research report, VTT Processes, Nuclear Energy 2005. PRO1-99T-03. 12 s.