

Vertailuanalyysin käyttö termohydraulisten koelaitteistojen tulosten laitosmittakaavaan skaalautumisen tutkimisessa

Diplomityö

Petteri Suikkanen

Vertailuanalyysin käyttö termohydraulisten koelaitteistojen tulosten laitosmittakaavaan skaalautumisen tutkimisessa

Diplomityö

Petteri Suikkanen

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Energia- ja ympäristötekniikan koulutusohjelma

Tarkastajat prof. Riitta Kyrki-Rajamäki, DI Eero Virtanen

Ohjaaja DI Eero Virtanen

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

ISBN 978-952-478-437-8 (nid., Edita Prima Oy 2008)
ISBN 978-952-478-438-2 (pdf)
ISSN 1796-7171

SUIKKANEN Petteri. Vertailuanalyysin käyttö termohydraulisten koelaitteistojen tulosten laitosmittakaavaan skaalautumisen tutkimisessa. Diplomityö. STUK-TR 8. Helsinki 2009. 51 s. + liitteet 33 s.

Avainsanat: PKL-koelaitteisto, LSTF-koelaitteisto, EPR, Olkiluoto 3, skaalaus, Apros

Tiivistelmä

Työn tavoitteena oli tarkastella termohydraulisten koelaitteistojen skaalauksessa käytettäviä periaatteita ja menettelyjä sekä vertailla Apros-simulaattoriohjelmalla laskettuja kahden koelaitteistomallin ja EPR-mallin tuloksia. Tarkoituksena oli saada käsitys siitä, miten hyvin tarkastellut koelaitteistot kuvaavat EPR-laitostyyppin käyttäytymistä onnettomuustilanteessa. Malleilla tutkittiin jäähdytteen määrän vaikutusta primääripiirin käyttäytymiseen. Koelaitteistomallien tuloksissa toistuvat samat ilmiöt kuin EPR-mallin tuloksissa. Laskettuja PKL-koelaitteistomallin tuloksia vertailtiin myös koelaitteistolla suoritettuun kokeeseen. PKL-mallin todettiin toistavan hyvin kokeen tulokset. Koelaitteistojen tuloksien perusteella kelpoistetaan laskentaohjelmia, joita käytetään ydinvoimalaitosten turvallisuustutkimuksessa. Erityistä harkintaa tulee käyttää koelaitteistojen tulosten hyödyntämisessä, sillä mittakaava vaikuttaa ilmiöiden esiintymiseen.

SUIKKANEN Petteri. Analysing the scalability of thermal hydraulic test facility data to reactor scale with a computer code. Master's thesis. STUK-TR 8. Helsinki 2009. 51 pp. + appendices 33 pp.

Keywords: PKL test facility, LSTF test facility, EPR, Olkiluoto 3, scaling, Apros

Abstract

The objective of the thesis was to study guidelines and procedures for scaling of thermal hydraulic test facilities and to compare results from two test facility models and from EPR model. Aim was to get an impression of how well the studied test facilities describe the behaviour in power plant scale during accident scenarios with computer codes. Models were used to determine the influence of primary circuit mass inventory on the behaviour of the circuit. The data from test facility models represent the same phenomena as the data from EPR model. The results calculated with PKL model were also compared against PKL test facility data. They showed good agreement. Test facility data is used to validate computer codes, which are used in nuclear safety analysis. The scale of the facility has effect on the behaviour of the phenomena and therefore special care must be taken in using the data.

Alkusanat

Kiitän Säteilyturvakeskusta mahdollisuudesta tehdä mielenkiintoinen ja haastava diplomityö. Haluan kiittää heitä, jotka ovat auttaneet ja mahdollistaneet tämän tavoitteen toteutumisen. Kiitokset käyttämäni laskentamallien kehittäjille. Kiitos vanhemmilleni. Lisäksi kiitän muusaani.

Helsingissä 30.10.2008

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKUSANAT	5
Symboliluettelo	8
Lyhenneluettelo	8
1 JOHDANTO	9
2 TERMOHYDRAULISTEN KOELAITTEISTOJEN SKAALAUS	10
2.1 Historia	10
2.2 Skaalauksessa huomioitavia asioita	11
2.3 Skaalauslait	13
2.3.1 Dimensioanalyysiin perustuva menetelmä	13
2.3.2 Fysiikan lakeihin perustuva menetelmä	14
2.3.3 Häiriöteoriaan perustuva menetelmä	14
2.3.4 FSA	14
2.4 Ilmiöiden tunnistaminen ja järjestely PIRT	15
2.5 Skaalauseimerkki PUMA	16
3 TERMOHYDRAULISET KOELAITTEISTOT	18
3.1 LSTF/ROSA V	18
3.2 PKL	18
3.3 Laitosyksiköiden Phillippsburg 2, Tsuruga 2 ja Olkiluoto 3 vertailu	19
4 LAITOSTEN JA KOELAITTEISTOJEN SIMULOINTI TIETOKONEOHJELMILLA	21
4.1 Termohydrauliikkaohjelmien kehitys ja käyttö	21
4.2 Apros	22
4.2.1 Apros-laskentamallit PKL, LSTF ja EPR	23
5 KOKEEN SIMULOINTI	25
5.1 PKL-koe	25
5.2 Kokeen simuloiminen Apros-malleilla	26
5.3 Laskenta PKL-mallilla	27
5.3.1 PKL-kokeen ja -laskennan vertailu	32
5.4 Laskenta LSTF-mallilla	35
5.5 Laskenta EPR-mallilla	40

6	TULOSTEN SKAALAUUS JA VERTAILU	45
7	SKAALATUISTA KOELAITTEISTOISTA TURVALLISUUSANALYYSEIHIN	47
8	YHTEENVETO	49
	LÄHDELUETTELO	50
LIITE 1	KUVAT PKL-LASKENNASTA	52
LIITE 2	KUVAT LSTF-LASKENNASTA	64
LIITE 3	KUVAT EPR-LASKENNASTA	74

Symboliluettelo

Symboli	Yksikkö	Selite
A	m^2	pinta-ala
E	J	energia
F	N	voima
Fr	-	Frouden luku
g	m/s^2	putoamiskiihtyvyyys
L	m	pituuden dimensio/pituus
l	m	korkeus
M	kg	massan dimensio
m	kg	massa
P	W	teho
p	Pa	paine
Q	-	fysikaalinen suure
Q_v	m^3/s	tilavuusvirta
t	s	aika
V	m^3	tilavuus
v	m/s	nopeus
Z	-	tilamuuttuja
λ	m	karakteristinen mitta
μ	-	kitkakerroin
Ω	-	dimensioton skaalausparametri
π	-	dimensioton ryhmä
ρ	kg/s	tiheys
τ	s	vaikutusaika
Φ	s^{-1}	muutoksen tekijä
ω	s^{-1}	osittainen muutostaajuus

Lyhenneluettelo

Apros	Advanced Process Simulation Environment, laskentaohjelmisto
CFD	Computational Fluid Dynamics, numeerinen virtauslaskenta
CVCS	Chemical and Volume Control System, vedenkäsittelyjärjestelmä
EPR	European Pressurized Water Reactor, painevesireaktorityyppi

FRC	Fractional Rate of Change, osittaismuutostaajuus
FSA	Fractional Scaling Analysis
Grades	Aprosin graafinen käyttöliittymä
HEM	Homogeneous Equilibrium Model, laskentamalli
ISP	International Standard Problem
JAERI	Japan Atom Energy Research Institute, tutkimuslaitos
KWU	Kraftwerk Union AG, voimalaitoksia valmistava yhtiö
LSTF	Large scale test facility, koelaitteisto
NEA	Nuclear Energy Agency, OECD:n alainen ydinenergiajärjestö
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development, järjestö
PACTEL	PARallel Channel Test Loop, koelaitteisto
PI	Proportional-Integral controller, säädin
PIRT	Phenomena Identification and Ranking Table, ilmiötaulukko
PKL	Primärkreisläufe, koelaitteisto
PUMA	Purdue University Multi-dimensional integral test Assembly, koelaitteisto
PWR	Pressurized Water Reactor, painevesireaktori
REWET	testilaitteiden sarja LUT:issa
ROSA	Rig of Safety Assessment, koeohjelma
SBWR	Simplified Boiling Water Reactor, kiehutusvesireaktorityyppi
TMI	Three Mile Island, ydinvoimalaitos USA:ssa
U.S. NRC	United States Nuclear Regulatory Commission, Yhdysvaltain ydinturvallisuusviranomaisen
UPTF	Upper Plenum Test Facility, koelaitteisto
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus
VVER	Vodo-vodjanoi energetičeskij reaktor (Водо-водяной энергетический реактор), Venäläinen painevesireaktori

1 Johdanto

Työ on tehty Säteilyturvakeskuksen Reaktori- ja turvallisuusjärjestelmät -toimistolle. Säteilyturvakeskus on turvallisuutta valvova viranomainen, jonka on kyettävä arvioimaan sille esitetyt perustelut ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta. Asetettujen hyväksymiskriteerien täytyminen perustellaan laitoksen häiriö- ja onnettomuusanalyysillä. Analyysissä käytetään muiden työkalujen ohella termohydrauliikkaohjelmia. Näiden laskentaohjelmien kelpoisuutta turvallisuusanalyysien tekemiseen tarkastellaan vertaamalla laskennan ja eri koelaitteistoilla suoritettujen kokeiden tuloksia toisiinsa. Koelaitteistot rakennetaan usein skaalattuna, eli mallilaitosyksikköä pienemmässä mittakaavassa. Skaalaus onnistuminen määrää, kuinka hyvin koelaitteisto mallintaa voimalaitosta ja soveltuu käytettäväksi laskentaohjelmien kelpoistamiseen. Skaalaus on monimutkainen prosessi ja huomioitavia asioita on lukuisia. Työn tavoitteena oli tarkastella koelaitteistojen skaalauksessa käytettyjä periaatteita ja menettelyjä, sekä tutkia, miten hyvin laskentaohjelmalla työssä lasketut tulokset vastaavat koelaitteistolla saatuja tuloksia. Lisäksi pohdittiin haasteita, jotka liittyvät koelaitteistoilla tehdyn

tutkimuksen tulosten ja niiden avulla kelpoistettujen laskentaohjelmien käyttöön laitosmittakaavassa. Aluksi työssä tehdään katsaus kokeellisen turvallisuustutkimuksen historiaan ja esitellään termohydraulisten koelaitteistojen suunnittelussa käytettäviä skaalauslakeja ja periaatteita. Lisäksi vertaillaan laskentaohjelmalla laskettuja tuloksia koelaitteistolla suoritettuun kokeeseen. Lopuksi vertaillaan kahden koelaitteistomallin antamia tuloksia EPR-mallilla laskettuihin tuloksiin. Työssä pyrittiin lisäksi selvittämään, miten hyvin kahden tutkitun koelaitteiston tulokset olisivat hyödynnettävissä Olkiluotoon rakennettavan kolmannen voimalaitosyksikön turvallisuusarvioissa. Olkiluoto 3 on EPR (European Pressurized Water Reactor) -tyyppinen ydinvoimalaitosyksikkö.

Koelaitteistojen käyttöä turvallisuustutkimuksessa on käsitelty muun muassa Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa tehdyssä Heikki Purhosen väitöskirjassa [1]. Diplomityössä on tarkasteltu koelaitteistojen käyttöä turvallisuustutkimuksessa painottuen skaalaukseen ja laskentaohjelmiin liittyviin asioihin.

2 Termohydraulisten koelaitteistojen skaalaus

Ydinvoimalaitosyksiköiden käyttäytymistä onnettomuustilanteissa tutkitaan skaalatuilla koelaitteistoilla. Koelaitteistoilla pyritään saamaan kohtuullisin kustannuksin tuloksia, joiden pohjalta voidaan tehdä voimalaitoksen turvallisuutta koskevia päätelmiä. Termohydraulisten ilmiöiden riittävä ymmärtäminen on olennainen osa ydinvoimalaitosten turvallista käyttöä ja onnettomuustilanteiden hallintaa. Onnettomuustilanteiden tutkimisesta käytössä olevilla ydinvoimalaitoksilla saattaa aiheutua tarpeettomia riskejä. Historian vakavin ydinalan onnettomuus sai alkunsa vuonna 1986, kun Tshernobylin ydinvoimalaitoksella Ukrainassa suoritettiin laitoksen generaattorin käyttöön liittyviä kokeita. Skaalattujen koelaitteistojen käyttö mahdollistaa kokeiden tekemisen turvallisesti ja taloudellisesti. Kaikkia asioita ei koelaitteistoilla kuitenkaan ole mahdollista tutkia, jolloin tulee turvautua laskennallisiin tarkasteluihin. Koelaitteisto on rakennettavissa siten, että ilmiöiden visuaalinen havainnointi ja taltioiminen tulevat mahdolliseksi. Visuaalinen tarkastelu tukee esimerkiksi virtaus-tyypin tulkintaa ja parantaa tulosten laatua. Se helpottaa myös matemaattisten mallien kehittämistä, joita käytetään muun muassa ydinvoimalaitosta mallintavissa tietokoneohjelmissa. Matemaattisiin malleihin ja fysiikkaa kuvaaviin korrelaatioihin perustuvat myös virtauslaskentaohjelmat (CFD – Computational Fluid Dynamics), joissa usein käytetään hienojakoisempia laskentaverkkoja ja tutkitaan yksittäisiä virtausongelmia. Visuaalinen havainnointi auttaa virtauslaskennasta saatujen tulosten vertailua koetuloksiin erityisesti silloin, kun mittauksilla ei saavuteta riittävää resoluutiota tarkasteltavalle alueelle.

Termohydrauliset koelaitteistot voidaan jaotella erillis- ja integraalikoelaitteistoihin. Erilliskoelaitteistoja käytetään jonkin tietyn fysikaalisen ilmiön havainnointiin ja tutkimiseen sekä tietokonelaskentaohjelmien kelpoistamiseen. Erillis-

koelaitteistosta saatuja tuloksia voidaan käyttää myös integraalikoelaitteiston suunnittelussa, sillä erilliskoelaitteistolla kyetään määrittämään tietyn ilmiön tai parametrin merkitys oikeassa mittakaavassa. Erilliskoelaitteistossa on mahdollista rakentaa täysikokoinen kopio alkuperäisestä komponentista, jolloin vältetään skaalauksen ongelmilta. Integraalikoelaitteistoilla tutkitaan monimutkaisia komponenttien välisiä vuorovaikutuksia ja pyritään ymmärtämään paremmin laitoksen toimintaa erityisesti onnettomuus- ja häiriötilanteissa. Koelaitteistoilla saatuja tuloksia käytetään tietokoneohjelmien kelpoistamisen lisäksi perustutkimukseen, uusien laitosten suunnitteluun, käytössä olevien laitosten jatkuvaan parantamiseen, sekä viranomaisvalvonnan ja säännösten kehittämiseen.

2.1 Historia

Koetoiminta on kuulunut olennaisena osana ydintekniikkaan ensimmäisistä kriittisistä miiluista lähtien. Turvallisuusnäkökohtiin on aina panostettu ja jo ensimmäisen kriittisen reaktorin ketjureaktion pysäyttämiseksi oli suunniteltu erilaisia menetelmiä. Alan jatkuva kehitys ja pyrkimys turvallisuustason parantamiseen ovat vaatineet pitkäaikaista koetoimintaa. Voimakkaan tutkimuksen kohteena oleva ilmiökenttä laajeni termohydrauliikan alueella ydinturvallisuusasioissa kansainvälistä huomiota herättäneiden ydinvoimalaitosonnettomuuksien jälkeen. Ennen Three Mile Islandin (TMI) kakkosyksikön onnettomuutta vuonna 1979 oli turvallisuusjärjestelmissä keskitytty pääosin suuresta jäähdytteenmenetysonnettomuudesta selviämiseen, osin olettaen pienempien onnettomuuksien tulevan lievempinä samalla tarkasteluiksi. Samanaikaiset viat ja virhetoiminnot pienen jäähdytteenmenetysonnettomuuden yhteydessä osoittivat tarpeen tutkia turvallisuustoimintoja ja käytäntöjä laajemminkin. TMI:n onnettomuuden aikaisten ilmiöiden selvittämiseksi ja mallintami-

seksi rakennettiin skaalattuja koelaitteistoja ympäri maailmaa. Koelaitteistoilla on tutkittu runsaasti pienen jäähdytteenmenetyssonnettomuuden aikana esiintyviä ilmiöitä, kuten kaksifaasilämmönsiirtoa, boorin laimenemista ja luonnonkiertoa. Vakavien onnettomuuksien loppuvaiheiden aikaisia ilmiöitä on tutkittu erityisesti erilliskoelaitteistoilla. Näitä ilmiöitä ovat muun muassa vedyn muodostuminen polttoaineen zirkoniumsuojuakuoren hapettuessa korkeissa lämpötiloissa, sulaneen reaktorisydämen vuorovaikutukset paineastian ja rakenteiden kanssa sekä sulaneen polttoaineen ja veden aiheuttama höyryräjähdys.

Suomessa integraalikoelaitteistoilla on tutkittu ydinvoimalaitosten termohydrauliikkaa ja Loviisan painevesivoimalaitosta mallintava PACTEL (Parallel Channel Test Loop) valmistui Lappeenrantaan vuonna 1990. PACTELia ennen oli tutkittu muun muassa polttoaineen uudelleenkastumista jäähdytteenmenetyssonnettomuudessa REWET-koelaitteistojen sarjalla. PACTEL-koelaitteistolla on suoritettu ISP (International Standard Problem) -koe numero 33, osana NEA:n (Nuclear Energy Agency) kansainvälistä koetoimintaa. [2] Suoritettujen kokeiden perusteella on voitu tarkastella tietokoneohjelmien kykyä laskea onnettomuustilanteita. PACTEL:illa suoritettu ISP-33-koe oli samankaltainen kuin tässä työssä tarkastellut tapaukset PKL- (Primärkreisläufe) ja LSTF- (Large Scale Test Facility) koelaitteistoilla. ISP-33-kokeessa tutkittiin luonnonkierron toimintaa eri primäärijäähdytteen määrillä.

2.2 Skaalauksessa huomioitavia asioita

Koelaitteiston skaalauksella on olennainen rooli koeohjelman onnistumisessa, sillä huonosti suunnitellulla laitteistolla ei välttämättä saavuteta sille asetettuja tavoitteita. Pahimmassa tapauksessa liiallinen säästäväisyys tai aikataulupaineet suunnitteluvaiheissa saavat aikaan hyödyttömän koelaitteiston, jossa ei esiinny tutkittavaksi haluttuja ilmiöitä. Suunnitteluvaiheen ratkaisut ja niiden perustelut tulisi dokumentoida huolella. Laadukkaasta dokumentaatiosta on merkittävää hyötyä muun muassa tuloksia tutkittaessa ja kokeita suunniteltaessa.

Koelaitteiston skaalaus on vertailuun perustuvaa kompromissin hakua ja optimointia. Teoriassa integraalilaitteiston jokainen komponentti tulisi skaalata erikseen huomioiden kaikki koelaitteis-

tossa mahdollisesti esiintyvät ilmiöt. Jokaisen komponentin skaalauksessa tulisi huomioida tärkeiden suureiden vaihtelu laajalla välillä koeohjelman aikana. Lisäksi tulisi huomioida komponenttien väliset vuorovaikutukset, jotka tekevät skaalauksesta entistäkin haasteellisempaa. Tällaisesta lähestymistavasta seuraa valtava määrä dimensiottomia parametreja, joiden kaikkien samanaikainen säilyttäminen alkuperäistä laitosta vastaavana on mahdotonta. Käytännössä koelaitteiston suunnittelussa pyritään säilyttämään tärkeiksi todetut prosessit ja ilmiöt. Kappaleessa 2.4 on esitelty perusteita ilmiöiden tärkeysjärjestykseen laittamiselle. Koelaitteiston suunnittelijalla täytyy olla riittävä tietämys kokeen oletettavasta kulusta, etteivät suunnittelussa huomiotta jätettyjen ilmiöiden aiheuttamat vääristymät kasvaisi suhteettoman suuriksi. Eri onnettomuustyyppisiä tutkittaessa muodostuu ilmiökenttä varsin vaihtelevaksi. Vain yhtä tarkoitusta varten suunniteltuun koelaitteistoon saatetaan joutua tekemään suuria muutoksia haluttaessa tutkia alkuperäisestä poikkeavaa tapausta. Koelaitteistosta olisikin hyvä suunnitella jo alkuvaiheessa riittävän helposti muokattava mahdollisia myöhempiä tarpeita varten.

Ryhdyttäessä suunnittelemaan skaalattua koelaitteistoa on aluksi määriteltävä riittävällä tarkkuudella, mitä laitteistolla on tarkoitus tutkia. Koelaitteiston kokoluokka on valittava suunnittelun alkuvaiheessa huomioiden, että tutkittavat ilmiöt on saatava esiin rakennettavassa laitteistossa [3]. Usein koelaitteiston kokoon vaikuttavat käytävissä olevat resurssit. Joskus myös koelaitteistolle suunniteltu tila aiheuttaa rajoituksia [4]. Suunnittelun alkuvaiheessa on päätettävä rakennetaanko täysikorkuinen vai korkeusskaalattu laitteisto. Useimmissa integraalikoelaitteistoissa on päädytty säilyttämään korkeus alkuperäisenä, jolloin hydrotaattinen paine kiertopiirin eri osissa säilyy mallilaitosyksikköä vastaavana. Tilavuusskaalauksen ja alkuperäisenä säilytetyn korkeuden perusteella kierto-putkista on muodostunut halkaisijaltaan pieniä, jolloin ilmiöt tapahtuvat käytännössä yhdessä dimensiossa. Joidenkin ilmiöiden esiintyminen voi häiriintyä tai jopa kokonaan estyä liian pieneksi skaalatussa laitteistossa. Tällaisessa laitteistossa myös pinta-alan suhde tilavuuteen kasvaa ja pintajännityksen vaikutus muodostuu epärealistisen suureksi. Tilavuusskaalauksen perusteella reaktoripaineastian sisähalkaisija pienenee normaalisti

useista metreistä desimetreihin. Tilavuussuhteella 1:2000 skaalatulla SEMISCALE -integraalikoelaitteistolla tutkittiin kuuman haaran hätäjähdytysjärjestelmän veden virtausta reaktorin ylätilan kautta reaktoriin. Pienestä reaktoripaineastian halkaisijasta johtuen ylätila täyttyi hätäjähdytysvedellä eikä jäädyttänyt sydäntä. Samalla ylätilaan kertynyt vesi esti vesi-höyryseoksen kulkeutumista sydämen läpi aiheuttaen epärealistisen lämpötilan nousun. Lisätarkastelut UPTF (Upper Plenum Test Facility) -koelaitteistolla, joka mallintaa täysimittaisena ylätilaa ja osaa primääripiiristä, osoittivat SEMISCALE -integraalikoelaitteistosta saatujen tulosten olevan käyttökelvottomia sydämen jäädytyksen tutkimiseen.

Koelaitteiston pienempi koko vaikuttaa myös rakenteisiin varastoituvaan lämpöön. Kun laitoksen annetaan hakeutua stationääritilaan, päätyvät kiertopiirin rakenteet ajan myötä termiseen tasapainoon piirissä kulkevan jäädytteen kanssa. Kun piirissä tapahtuu jokin jäädytteen lämpötilaa laskeva muutos, vaikuttaa lämpörakenteisiin varastoitunut lämpöenergia piirin käyttäytymiseen hidastavasti. Vastaavasti, jos piirin lämpötila kasvaa, menee osa lämmöstä lämpörakenteiden lämmittämiseen. Lämpörakenteiden vaikutukset järjestelmän käytökseen voivat olla huomattaviaakin. Esimerkiksi nopea paineen lasku saattaa aiheuttaa kiehumista kuuman lämpörakenteen luovuttaessa lämpöä jäädytteeeseen. Lämpörakenteiden vaikutusten toistaminen samanlaisina kuin mallilaitoksessa on koelaitteistossa mahdotonta. Eroavaisuuksien karsiminen vaatii huolellista lämpörakenteiden huomioimista sekä skaalauksessa että koetta suoritettaessa. Lämpörakenteet voivat vääristää kokeen tuloksia myös, jollei niiden ole annettu hakeutua termiseen tasapainoon ennen kokeen alkua. Sähkövastuksilla voidaan tarvittaessa simuloida laitoksen lämpörakenteisiin varastoitunutta lämpöenergiaa. Sähkölämmittimiä voidaan käyttää lisäksi kompensoimaan koelaitteistossa mahdollisesti esiintyviä liian suuria lämpöhäviöitä. Ensisijaisesti lämmönsiirtoa ympäröivään tilaan sovitetaan halutun suuruiseksi eristemateriaalin tai eristeen paksuuden valinnoilla. Lämpöhäviöt koelaitteistossa ovat ilman lisäkompensointiä eristepaksuudessa suhteellisesti suurempia, sillä koelaitteiston pienempi putkiston halkaisija muuttaa putkiston ulkopinnan ja virtausalan suhdetta.

Matalammalla koelaitteistolla on mahdollista

saada avarammat virtauskanavat samalla tilavuusskaalauksella. Kustannukset voivat nousta korkeusskaalausta käyttämällä, sillä halkaisijaltaan suurempien paineastioiden ja virtauskanavien rakentaminen on kalliimpaa. Korkeusskaalatussa koelaitteistossa tapahtumien kesto ei ole yhtenevä mallinnettavan laitoksen kanssa luonnonkierrolla. Tapahtumien eriaikainen ilmeneminen on huomioitava tulosten tulkinnessa ja kokeiden suunnittelussa. Pitkiä aikoja kestävien häiriöiden ja onnettomuuksien tutkimisessa ilmiöiden nopeutumisesta voi olla suurta etua. Tarpeettoman pieneksi skaalattu koelaitteisto voi vaikeuttaa mittauksien luotettavaa suorittamista, koska ilmiöt tapahtuvat liian nopeasti. Lisäksi mittauksesta aiheutuva häiriö tutkittavan ilmiön käyttäytymiselle tulee huomioida. Pienessä koelaitteistossa mittaus voi aiheuttaa suhteellisesti suuremman häiriön kuin suuremmassa koelaitteistossa. Koelaitteiston suunnittelupaineen valinta vaikuttaa ratkaisevasti laitteiston kustannuksiin, sillä laitteiden hinta kasvaa painevaatimusten lisääntyessä. Kustannuksiin vaikuttavat myös painelaitelainsäädännöstä johtuvat velvoitteet.

Koelaitteistojen lämmönlähteenä käytetään usein sähkövastuksia. Usein käytettävissä oleva sähköteho on rajoitettu. Käytettävissä oleva teho vaikuttaa tilavuusskaalaukseen, kun halutaan säilyttää tietty suhde tehon ja järjestelmän tilavuuden välillä [5]. Koelaitteiston maksimipaine ja tehon suhde tilavuuteen määräytyy sen perusteella, mitä koelaitteistolla halutaan tutkia. On pyrittävä löytämään riittävän tarkasti tutkittavat ilmiöt kuvaava, mutta kuitenkin taloudellisesti perusteltavissa oleva ratkaisu.

Erilliskoelaitteiston skaalauksessa eräs suhteellisen helppo ja useasti hyödynnetty tapa on ottaa jokin sektori mallilaitosyksikön komponentista täysmittaisena tutkittavaksi. Samanlaista metodologiaa käytetään usein integraalikoelaitteistossa jonkin tärkeän ja hankalasti skaalattavan komponentin kuten reaktorisydämen skaalauksessa. Tällöin reaktoria mallinnetaan yhdellä tai useammalla polttoainepullalla. Samalla saadaan yksinkertaisella keinolla varmistettua, että tärkeät ilmiöt, kuten virtaustyyppien kehittyminen reaktorissa, saadaan esiin koelaitteistossa. Lisäksi integraalikoelaitteiston osaa voidaan tällöin käyttää koetoiminnassa myös erilliskoelaitteiston tavoin. Sektorin käyttöön perustuvassa skaalaustavassa on huonona puolena

sen mahdollisesti aiheuttamat vääristymät koelaitteiston kokonaiskäyttäytymiseen.

Integraalikoelaitteiston skaalauksessa tulisi huomioida sekä laitteiston kokonaiskäyttäytymisen että paikalliset, komponenttitason ilmiöistä tulevat vaatimukset. Tarkastelutasoja voivat olla paikallinen prosessi- tai ilmiökohtainen taso, komponenttitaso sekä koko systeemin kattava taso. Eri tasoilla tehdyt tarkastelut tuovat tietoa prosessien tärkeysjärjestyksestä ja keskinäisistä vuorovaikutuksista. Skaalaamalla ainoastaan komponentit ja unohtamalla komponenttien vuorovaikutukset muodostuu vääristymiä, sillä tällainen skaalaustapa toimii vain, jos kaikki paikalliset, keskenään usein ristiriitaiset skaalauslaitteet saadaan täytettyä. Koelaitteisto on enemmän kuin osiensa summa. Integraalikoelaitteiston komponenttien vuorovaikutus on yksi tärkeimmistä tutkimuskohteista, minkä vuoksi vuorovaikutukset tulee tarkkaan huomioida koelaitteistoa suunniteltaessa.

Koelaitteistossa on mahdollista käyttää mallilaitosyksiköstä poikkeavaa virtaavaa ainetta. Käyttämällä esimerkiksi kylmälaitteista tuttuja työaineita, kuten freoneja, on mahdollista rakentaa edullinen koelaitteisto kaksifaasi-ilmiöiden tutkimiseen. Erilliskoelaitteistoissa tällaista lähestymistapaa on käytetty menestyksekkäästi. Haasteeksi muodostuu virtaavan aineen vaihtuessa esimerkiksi turbulenssin vaikutuksen huomioiminen. Lisäksi Reynoldsin lukuun vaikuttavat erot virtaavan aineen tiheyksissä ja viskositeeteissä. [6]

2.3 Skaalauslait

Koelaitteiston skaalaus perustuu skaalauslakeihin, joiden avulla johdetaan dimensiottomia ryhmiä. Koelaitteiston mittojen ja suhteiden määrittelyminen tapahtuu näiden dimensiottomien lukujen perustella. Dimensiottomat luvut, kuten Reynoldsin luku, määrittelevät ilmiön. Lukujen ollessa samansuuruisia skaalatessa ja skaalattavassa laitteistossa voidaan olettaa molemmissa esiintyvien ilmiöiden käyttäytyvän samalla tavalla. Skaalauslait antavat siten perustelut tehdyille ratkaisuille koelaitteiston suunnittelussa. Dimensiottomien lukujen muodostamiseksi on kehitetty useita menetelmiä. Seuraavissa kappaleissa on esimerkkeinä käyty läpi muutamia. Erilaisia menetelmiä voidaan yhdistellä eri tasoilla tapahtuvissa tarkasteluissa. Usean menetelmän käytöllä voidaan ainakin osin kompensoida yksittäisten menetelmien

heikkouksia. Esimerkkinä useamman menetelmän rinnakkaisesta käytöstä on kappaleessa 2.5 selvitetty PUMA (Purdue University Multi-dimensional integral test Assembly) -integraalikoelaitteiston skaalausta.

2.3.1 Dimensioanalyysiin perustuva menetelmä

Edgar Buckingham esitti vuonna 1914 π -teoreemaan perustuvan dimensioiden analyysin. [7] Buckinghamin π -teoreeman mukaan jokainen suureyhtälö on kirjoitettavissa dimensiottomaan muotoon. Tällöin ilmiöön vaikuttavien suureiden yhtälöstä

$$Q_1 = f(Q_2, Q_3, \dots, Q_n), \quad (1)$$

jossa Q on fysikaalinen suure, saadaan dimensiottomien π -ryhmien funktio

$$\pi_1 = f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-k}), \quad (2)$$

jossa k on yhtälössä 1 esiintyvien perusdimensioiden lukumäärä. Perusdimensioita voivat olla esimerkiksi pituus, massa ja aika.

Dimensiottomat π -ryhmät osoittavat mitkä parametrijoukot tulisi saada samoiksi mallilaitoksessa ja skaalattavassa koelaitteistossa. Dimensioanalyysissä käytettävät ilmiöön vaikuttavat suureet eli määräävät tekijät tulee joko arvata tai tietää. Väärin valitut tai puuttuvat tekijät saattavat johtaa virheellisiin päätelmiin. Tekniikan käsikirjassa on esitetty Reynoldsin luvun johtaminen dimensioiden avulla [8]. Dimensioanalyysin hyvänä puolena on, ettei tarvitse kehittää tai ratkaista monimutkaisia differentiaaliyhtälöitä. Dimensioanalyysiä käytettäessä vältetään tarpeelta tietää ilmiötä kuvaavaa fysiikan lakia, joten dimensioiden analyysi soveltuu hyvin käytettäväksi huomattavasti tunnettuihin ilmiöihin.

Eräs lupaavalta vaikuttava dimensioiden analyysin laajennus on suuntien huomioiminen suureiden määrittelyssä. Karteesisessa koordinaatistossa tulee pituuden yksiköitä kolme, yhden perussuureen eli pituuden sijaan. Tällöin esimerkiksi tiheyden dimensiolauseke

$$[\rho] = ML^{-3}, \quad (3)$$

jossa M kuvaa massan ja L pituuden dimensiota, muuttuu muotoon

$$[\rho] = M L_x^{-1} L_y^{-1} L_z^{-1}, \quad (4)$$

jossa alaindeksit x, y ja z kuvaavat kolmea toisis-

taan riippumatonta suuntaa. Idean suuntien huomioimisesta dimensioanalyysissä esitti J. Palacios vuonna 1964. Madrid ja Alhama ovat esittäneet, etteivät perinteiset dimensiottomat luvut välttämättä ole riippumattomia dimensiottomia ryhmiä, kun suunnat huomioidaan. Suuntien erottelulla dimensioanalyysissä esimerkiksi Reynoldsin ja Nusseltin luvut voidaan tapauskohtaisesti yhdistää uusiksi dimensiottomiksi luvuiksi. Suuntien huomioimisella saataisiin vähennettyä analyysistä saatavien dimensiottomien ryhmien määrää. [9 ja 10]

2.3.2 Fysiikan lakeihin perustuva menetelmä

Skaalauslakeja voidaan johtaa myös fysiikan lakeihin perustuvalla menetelmällä. Tätä menetelmää voidaan hyödyntää, kun ilmiötä kuvaavat yhtälöt tunnetaan. Ilmiötä kuvaavasta yhtälöstä tehdään dimensioton suhteuttamalla yhtälössä olevat fysikaaliset suureet referenssiarvoihinsa. Saadulla dimensiottomalla ryhmällä on tunnettu fysikaalinen merkitys. [11] Skaalauksessa yleisimmin käytettyjä lakeja ovat esimerkiksi energian, massan ja liikemäärän säilymislait. Säilymislaeista johdettujen dimensiottomien ryhmien asettaminen tärkeysjärjestykseen voi olla haasteellista, sillä skaalauksesta ei saada selville kuinka paljon tietty dimensioton ryhmä vaikuttaa tutkittavaan ilmiöön. Säilymislakien lisäksi dimensiottomia parametreja voidaan johtaa myös käyttämällä empiirisiä malleja. Empiiriset mallit kuvaavat muun muassa lämmönsiirtoa tai virtausta ja ne on johdettu koetuloksista tietyille pätevyysalueelle, jonka ulkopuolella ne eivät välttämättä anna realistisia tuloksia. Näiden mallien käyttämistä pätevyysalueensa ulkopuolella tulee välttää myös skaalauksessa [5].

2.3.3 Häiriöteoriaan perustuva menetelmä

Kolmas menetelmä skaalauslakien muodostamiseksi perustuu häiriöteoriaan. Menetelmässä systeemissä esiintyvää ilmiötä kuvaava yhtälö voidaan ratkaista varioimalla lähtöarvoja maltillisesti. Järjestelmää siis häiritään pienillä muutoksilla. Skaalauslait saadaan johdettua häiriöiden aiheuttamasta systeemin dynaamisesta käytöksestä. Kaksifaasivirtaukselle skaalauslakeja on johdettu häiriöteorialla drift flux-mallista [12]. Tärkeimpien tekijöiden paikalliset muutokset saadaan ratkaistamalla järjestelmän toimintaa kuvaavat differentiaaliyhtälöt. Koko järjestelmän vaste saadaan selvi-

tettyä, kun paikalliset vasteet on kartoitettu. Koko järjestelmän muutoksia kuvaava yhtälö saatetaan dimensiottomaan muotoon, josta saadaan johdeksi skaalauslait. Menetelmän käyttö edellyttää, että määräävät yhtälöt ovat pitävästi määriteltyjä ja pienten muutoksien aiheuttamat reaktiot tutkittavassa järjestelmässä voidaan analyttisesti ratkaista.

2.3.4 FSA

Edellä mainittujen skaalausmenetelmien lisäksi on esitetty ”kaikenkattavaksi tarkasteluksi” Fractional Scaling Analysis (FSA), jossa skaalauksen perusteena käytetään suureen karakteristisen muutosnopeuden (muutoksen taajuuden) ja systeemin karakteristisen vasteajan tuloa. FSA sai alkunsa vakavien onnettomuuksien skaalausta koskevassa ohjelmassa vuonna 1991. [13 ja 14] FSA:n kulmakivi on osittainen muutostaajuus, jonka johtamiseksi tarkastellaan tilamuuttujan Z muutosnopeutta. Muutoksen aiheuttaa tekijä Φ , joka määritellään yhtälöllä

$$\frac{dZ}{dt} = \Phi. \quad (5)$$

Tilamuuttujan osittaismuutostaajuus FRC (Fractional Rate of Change) saadaan suhteuttamalla muutos referenssiarvoonsa

$$\omega = \frac{1}{Z} \frac{dZ}{dt}. \quad (6)$$

Yhtälöistä 5 ja 6 saadaan osittaisen muutostaajuuden lausekkeeksi

$$\omega = \frac{\Phi}{Z}. \quad (7)$$

Liikemäärälle sovellettuna osittainen muutostaajuus saa yhtälömuodon

$$\omega = \frac{F}{mv}, \quad (8)$$

jossa F on voima, m on massa ja v on nopeus. Energialle sovellettuna yhtälöstä 7 muodostuu

$$\omega = \frac{P}{E}, \quad (9)$$

jossa P on teho ja E on tarkasteltavan kappaleen energia. Osittaisen muutosnopeuden lisäksi skaalauslakia varten on tarkasteltava aikaa, jonka Φ vaikuttaa tarkasteltavassa tilavuudessa. Jos tila-

vuusvirta Q_v virtaa tilavuuden V lävitse, saadaan ilmiön vaikutusaika τ yhtälöstä

$$\tau = \frac{V}{Q_v}. \quad (10)$$

Vaikutusaika on tarkasteltavasta geometriasta riippuva suure ja saa siksi eri tarkastelutasoilla eri arvoja. Yksidimensioissa putkivirtauksissa, joissa virtauspoikkipinta-ala on vakio, vaikutusaika on pituuden ja virtaavan aineen keskimääräisen nopeuden funktio. Yleiselle virtauskanavalle vaikutusaika saadaan yhtälöllä

$$\tau = \frac{\lambda}{\langle v \rangle}, \quad (11)$$

jossa $\langle v \rangle$ on keskimääräinen nopeus ja λ on karakteristinen mitta. Karakteristinen mitta riippuu prosessista ja geometriasta ja on määriteltävissä yhtälöllä

$$\lambda = \frac{V}{A}, \quad (12)$$

jossa V on tarkasteltava tilavuus ja A on ala, jonka kautta massa, energia tai liikemäärä siirtyy tarkasteltavaan tilavuuteen. Esimerkiksi kitkavoima vaikuttaa virtaavassa putkessa seinämän pinta-alalta ja massan virtaus putken poikkipinta-alan alueelta. Skaalausta varten tarvittava verrattava suure saadaan yhdistämällä edellä esitetyt suhteellinen muutostaajuus ja vaikutusaika yhtälöllä

$$\Omega = \omega\tau = \frac{\Phi}{Z}\tau, \quad (13)$$

jossa Ω on dimensioton skaalausparametri (effect metric). Yhtälöllä 13 on saatu dimensioton luku, joka kertoo tietyn ilmiön aiheuttaman suhteellisen muutososuuden tarkasteltavassa järjestelmässä. Jos koelaitteistossa ja alkuperäisessä laitoksessa järjestelmän tila muuttuu suhteessa saman verran, voidaan niiden käyttäytymistä pitää yhtenevänä. Kahden prosessin samanlaisuusvaatimuksena on, että muutosta aiheuttavan tekijän vaikutus järjestelmässä ilmenee samalla suhteellisella nopeudella. Tästä vaatimuksesta seuraa, ettei ole tarpeellista säilyttää suhteellista muutostaajuutta eikä vaikutusaikaa erikseen yhtenevinä.

Monimutkaisemmassa järjestelmässä, jossa on useampia muutoksenteikijöitä ja useita toisiinsa vaikuttavia komponentteja, on tarkasteltava efektiivisiä suureita. Useamman muutoksenteikijän

ja tarkasteltavan tilavuuden efektiivinen FRC riippuu muun muassa muutoksenteikijöiden suhteesta toisiinsa ja komponenttien kytkennöistä. Yksinkertaisena esimerkkinä voidaan tarkastella massakappaleeseen vaikuttavien voimien järjestelmää. Oletetaan kappaleen olevan tasolla ja siihen vaikuttavan voiman F . Liikemäärän muutostaajuus saadaan yhtälöstä 8. Pinnan ja kappaleen välinen kitka aiheuttaa liikettä vastustavan voiman, jonka vaikutus liikemäärään saadaan yhtälöstä

$$\omega_\mu = \frac{-F_\mu}{mv} = \frac{-\mu mg}{mv}, \quad (14)$$

jossa μ on kitkakerroin, m on kappaleen massa ja g on putoamiskiiktyvyys. Efektiivinen, mainittujen kahden voiman aiheuttama liikemäärän muutostaajuus saadaan laskemalla voimat yhteen jolloin saadaan

$$\omega_e = \omega_F + \omega_\mu = \frac{F}{mv} - \frac{\mu mg}{mv} = \frac{F - \mu mg}{mv}. \quad (15)$$

Vertailemalla liikemäärän muutostaajuuksien suuruuksia voidaan päätellä, kumpi tekijöistä dominoi muutosta. Suuremman FRC:n tekijä on merkityksellisempi järjestelmän muutoksen kannalta. Vastaava tarkastelu pätee myös, jos muutoksenteikijöitä on järjestelmässä enemmän. Tällaista vertailua voidaan käyttää hyödyksi ilmiöiden tärkeysjärjestyksen määrittämisessä. Efektiivinen FRC antaa skaalaustekijän, joka huomioi muutoksenteikijät oikeassa suhteessa. FSA:ta on sovellettu esimerkiksi kaltaisesti jäädytteenmenetysonnettomuuden skaalaukseen [15, 16 ja 17].

2.4 Ilmiöiden tunnistaminen ja järjestely PIRT

Eri tavoin muodostettujen dimensiottomien lukujen tärkeyden vertailemiseksi voidaan laatia PIRT (Phenomena Identification and Ranking Table), jossa ilmiöiden fysikaalinen tärkeysjärjestys määritetään ja järjestetään saatu tuotos tarkoituksenmukaiseen taulukkoon. Ilmiön tärkeyttä kuvaa sen oletettava vaikutus tutkittavan häiriön kulkuun. Myös muita, turvallisuuden kannalta tärkeään parametriin sidottuja kriteereitä voidaan käyttää tärkeyden määrittelyssä. Tällainen parametri voi olla esimerkiksi suojakuoren maksimilämpötila jäädytteenmenetysonnettomuudessa. PIRTIä varten tutkittavana oleva onnettomuustapaus on jaettava vaiheisiin. Jäädytteenmenetysonnetto-

muus voidaan jakaa esimerkiksi ulospuhallukseen, uudelleentäyttymiseen ja pitkäaikaiseen jäädytykseen. Eri vaiheiden aikana fysikaalisten ilmiöiden tärkeysjärjestys vaihtelee. Vaiheiden mukaisesti vaihtuvat määräävät ilmiöt aiheuttavat usein risiiritaisia skaalaustarpeita. Ilmiöiden ja vaiheiden suuresta määrästä johtuen PIRT on laaja kokonaisuus. Selkeään ja johdonmukaiseen rakenteeseen tulee pyrkiä, sillä se helpottaa kokonaisuusien hahmottamista.

Lopputuloksena saatavassa taulukossa esitetään häiriön tai onnettomuuden aikana eri vaiheisiin jaoteltuna kokeen aikana mahdollisesti esiintyvät ilmiöt ja merkitään niiden vaikutus tärkeäksi katsottuun suureeseen tai onnettomuuden lopputulokseen jollain loogisella tavalla. Tavanomaista on ollut, että PIRT laaditaan usean asiantuntijan yhteistyönä tai kyselylomakkeiden avulla. Ilmiöiden tärkeyden merkitsemiseen voidaan käyttää esimerkiksi kolmiportaista H, M, L (high, medium, low) -jaottelua. [4] Myös useampitasoista jaottelua on käytetty, jolloin on saatu vähemmän karkea jako. Mikäli jonkin ilmiön tärkeyttä ei suoraan osata päätellä, voidaan joutua tekemään erilliskokeita ilmiön tärkeyden määrittämiseksi. Huonosti tunnettu ilmiö voidaan vaihtoehtoisesti olettaa tärkeäksi, jolloin ei vahingossa jätetä huonosti tunnettua tärkeää ilmiötä huomiotta.

Yhdysvaltain ydinturvallisuusviranomaisen U.S. NRC on pitänyt tärkeänä, että PIRTiin merkitään ilmiön tärkeyden lisäksi se, miten hyvin kyseinen ilmiö tunnetaan ja osataan mallintaa [18]. Epävarmuuden merkitseminen tukee PIRTin tulkintaa ja varmistaa, että mahdolliset erilliskoelaitteistoilla suoritettavat lisäkokeet suunnataan kattamaan tärkeitä ja huonosti tunnettuja ilmiöitä. Tärkeysjärjestykseen laittamisen perusteella voidaan jättää kokeen kannalta epäoleelliset ilmiöt skaalauksessa vähemmälle huomiolle tai jopa kokonaan huomiotta. Eri laitoksille ja onnettomuustyypeille löytyy kirjallisuudesta aiemmin laadittuja valmiita ilmiöttaulukkoita, joita voidaan käyttää pohjana uuden taulukon laadinnassa. PIRTiä tulisi päivittää sitä mukaa, kun saadaan uutta tietoa koetuloksista, jolloin sitä voidaan käyttää laadunvarmistukseen ja tulosten raportointiin. PIRTiä voidaan käyttää myös tietokoneohjelmien kehityksessä varmistama-

an, että tärkeät ilmiöt tulevat kuvattua ohjelmissa, eikä laskenta-aikaa kuluteta vähemmän tärkeiden ilmiöiden laskentaan. PIRTin käsittelyä voidaan laajentaa ilmiöiden lisäksi koskemaan myös prosesseja, aineominaisuuksia, alkuehtoja ja muita asioita, joilla arvellaan olevan merkitystä tutkittavalle asialle. PIRTiä käytetään myös tietokoneanalyysien herkkyytstarkasteluissa rajaamaan tarkasteltavien parametrien määrää.

2.5 Skaalaus-esimerkki PUMA

PUMA on General Electricin suunnitteleman kiehutusvesireaktorityypin SBWR (Simplified Boiling Water Reactor) -tutkimusta varten rakennettu integraalikoelaitteisto. PUMA:lla on tutkittu muun muassa SBWR:n käynnistämävaiheen epästabii-lisuuksia, jotka esiintyvät matalissa paineissa. Kiehutusvesireaktorityyppi SBWR on suunniteltu käyttämään luonnonkiertoa sydämen jäädytyksessä, eikä siinä ole pääkiertopumppuja. Integraalikoelaitteistot on perinteisesti pyritty rakentamaan täyskorkuisena, jotta aineominaisuudet, hydrostaattisen paineen vaikutus sekä paikalliset paineet saadaan suoraan mallinnetuiksi koelaitteistossa. Edellä kuvattu lähestymistapa yksinkertaistaa skaalausta osin, mutta saattaa aiheuttaa hankaluuksia säilyttää kiertopiirin geometrinen samankalaisuus mallilaitoksen ja koelaitteiston välillä. PUMA on korkeudeltaan skaalattu tekijällä 1:4 ja siltä osin se poikkeaa koelaitteistojen yleisestä linjasta täydentäen kansainvälistä koelaitteistojen kirjoa. PUMA-koelaitteistoa ei ole suunniteltu käytettäväksi mallilaitoksen käyttöpainessa. Maksimipaine PUMA:ssa on noin 1,03 MPa, jonka vuoksi kokeen lähtötilanne voidaan joutua laskemaan tietokoneohjelmilla. Tietokoneohjelmilla lasketaan esimerkiksi jäädytteenmenetysonnettomuuden alkuvaiheita, kunnes primääripiirin paine on pudonnut koelaitteiston suurimpaan sallittuun paineeseen. Näin saatua tilaa käytetään koelaitteistossa alkutilana. Koelaitteisto ajetaan laskennalla saatuun alkutilaan ja suoritetaan koe loppuun koelaitteiston sallimilla paineilla. Alkuvaiheen laskeminen tietokoneella on perusteltua, sillä laskennassa käytetty ohjelma laskee riittävällä tarkkuudella ulospuhallusvaiheen.

Taulukko 1. PUMA-koelaitteiston tärkeimmät skaalaus-tekijät. [4]

Suure	Skaalaustekijä
Aika	1/2
Korkeus	1/4
Kuristetun virtauksen ala	1/200
Massavirta	1/200
Teho	1/200
Tilavuus	1/400
Virtausala	1/100

PUMA:n skaalauksessa on tarkastelu suoritettu kolmella tasolla. Kaksi ensimmäistä tarkastelutasoa pitävät sisällään koko järjestelmän tarkastelua staattisessa ja dynaamisessa tilassa. Kolmas taso käsittelee paikallisia ilmiöitä.

Ensimmäisen tason tarkastelussa skaalauslait koko järjestelmän vasteelle on johdettu yksifaasivirtaukselle komponenttien yksidimensioisista säilymisytälöistä, jotka integroituna virtausreitin yli kuvaavat koko järjestelmän toimintaa. Kaksifaasivirtauksesta on saatu skaalauslakeja soveltamalla häiriöteoriaa yksidimensioiseen drift flux-mallin. Kaksifaasivirtauksen yhtälöistä saadaan tapahtumien aikaskaalaustermi, jota yksifaasivirtauksen geometrian skaalausvaatimukseen soveltamalla muodostuu geometrian skaalausvaatimuksista samat sekä yksi- että kaksifaasivirtauksille. Tapahtumat nopeutuvat korkeudeltaan madalletussa koelaitteistossa. Tapahtumien aikaskaalaus on saatu johdetuksi riippumaan korkeussuhteesta yhtälön

$$\tau_R = \left(\frac{l_0}{u_0} \right)_R = \sqrt{(l_0)_R} \quad (16)$$

mukaisesti, jossa τ_R on mallin tapahtumien kesto suhteessa mallilaitoksen tapahtumien kestoan, l_0 on referenssikorkeus ja u_0 referenssinopeus. Alaindeksi R merkitsee mallin arvojen suhdetta mallilaitosyksikön arvoihin. Vastaava geometrisen- ja aikaskaalan neliöjuuri riippuvuus on johdettu luonnonkiertojärjestelmille myös muissa lähteissä. [19]

Toinen tarkastelutaso käsittää kontrollitilavuuksien energia- ja massataseiden tarkastelun, joista saadaan skaalauslait komponenttien välisille vuorovaikutuksille sekä vuotokoolle ja turvallisuusjärjestelmien mitoitukselle. Paineen muutosnopeus järjestelmässä on pidetty alkuperäistä vastaavana, kun huomioidaan korkeussuhteen aiheuttama ajan muunnos.

$$\frac{dp_m}{dt_m} = \left(\frac{1}{l_0} \right)_R^{\frac{1}{2}} \frac{dp_p}{dt_p} \quad (17)$$

Tämä ehto saadaan täytettyä, kun säilytetään komponenteissa olevan jäädytteen ja tilavuuksien suhde alkuperäisenä eri inventaareilla. Jäädytte toisin sanoen jakaantuu eri puolille koelaitteistoa mallilaitosyksikön tilannetta vastaavasti.

Kolmas tarkastelutaso koskee paikallisia ilmiöitä, kuten sekoittuminen kerrostuneissa säiliöissä ja epästabiili virtaus reaktoripaineastiassa. Tällä tasolla on skaalattu myös kriittinen lämpövuoto, lämmön lähteet ja nielut. [4]

3 Termohydrauliset koelaitteistot

Ydinvoimalaitosten termohydrauliikan tutkimiseksi koelaitteistoja on rakennettu erityisesti kansallisten tutkimusohjelmien puitteissa. Koelaitteistojen tehtävänä on tukea maiden omaa ydinvoimateknistä tietotaidon kehittämistä. Käytännössä kaikissa maissa, joissa tuotetaan ydinenergiaa, on omaa ydintekniikan alan tutkimusta. Kansainvälistä koetoimintaa on koordinoitu muun muassa OECD:n välityksellä, jolloin kustannuksia on voitu jakaa usean maan kesken ja tulokset on saatu hyödynnettäväksi laajemmin. Kansainvälisellä yhteistyöllä erilaisten koelaitteistojen tulokset täydentävät toisiaan ja ilmiöihin vaikuttavista tekijöistä saadaan parempi käsitys. Seuraavissa kappaleissa on esitetty kaksi koelaitteistoa. Näiden koelaitteistojen mallien tuloksia on käytetty tässä diplomityössä. Työssä tarkasteltavien koelaitteistojen suunnittelussa käytettyjä mallilaitosyksiköitä on lisäksi verrattu EPR-tyyppiseen Olkiluoto 3 voimalaitosyksikköön.

Termohydraulisten koelaitteistojen suunnittelussa skaalauksella määritetään koelaitteiston dimensiot. Skaalausta ja kriittistä näkemystä tarvitaan myös saatujen tulosten tulkintojen viemisessä laitosmittakaavaan.

3.1 LSTF/ROSA V

Japan Atomic Energy Research Institutun (JAERI) Large Scale Test Facility (LSTF) on 1:48 tilavuusskaalattu integraalikoelaitteisto, joka on suunniteltu pienten jäähdytteenmenetysonnettomuuksien sekä eri häiriöiden tutkimiseen. LSTF mallintaa Westinghouse-tyyppistä nelikiertopiiristä painevesilaitosta. Koelaitteistoa käytetään Rig of Safety Assessment (ROSA) -ohjelmassa. LSTF perustuu Tsuruga 2-painevesireaktorilaitosyksikköön. Koelaitteisto on korkeussuhteiltaan yhtenevä mallilaitosyksikkönsä kanssa, eli se on noin 30 metriä korkea. Poiketen muista tässä työssä tarkastelluista tapauksista LSTF mallintaa neljää kiertopiiriä kahdella kiertopiirillä, joiden tilavuudet on skaalattu tekijällä

Taulukko 2. LSTF-koelaitteiston tärkeimmät skaalaus-tekijät. [21]

Suure	Skaalaustekijä
Aika	1/1
Korkeus	1/1
Paine	1/1
Teho	7/50
Tilavuus	1/48
Virtausala	1/48 ja 1/24

1:24. Virtauskanavien poikkipinta-alat on skaalattu paineestiassa 1:48 ja höyrystimissä 1:24. Kylmissä ja kuumissa haaroissa skaalaus on tehty säilyttäen putkien pituuden suhde putken halkaisijan neliöjuureen, jotta virtaustyyppin muuttuminen ja sen aiheuttamat muutokset lämmönsiirrolle tulevat simuloituiksi paremmin. Sydämen teho on 10 MW, joka skaalattuna vastaa noin 14 prosenttia mallilaitosyksikön tehosta. Polttoainepun dimensiot on säilytetty alkuperäistä 17×17 nippua vastaavina, mutta nippujen määrä sydämessä on skaalattu tekijällä 1:48. Koelaitteen suunnittelupaine kattaa mallilaitosyksikön painealueen. Virtaukset on skaalattu 1:48, missä se vain on ollut käytännössä mahdollista. Kitkapainehäviöt skaalatuille virtauksille on suunniteltu samoiksi kuin mallilaitosyksiköllä. LSTF mallintaa tärkeimmät primääripiirin järjestelmät, sekä osan sekundääripiiristä. [21]

3.2 PKL

PKL on Areva NP:n täysikorkeuksinen koelaitteisto. Koelaitteiston skaalauksessa on mallinnettu KWU:n (Kraftwerk Union) nelikiertopiiristä 1300 MW painevesireaktorityyppiä. Mallilaitosyksikkönä on Phillippsburg 2. PKL-koelaitteistossa on esikuvaansa vastaavasti neljä kiertopiiriä. Koelaitteistossa on mallinnettu tärkeimmät turvallisuusjärjestelmät ja muut tärkeät komponentit. Teho, tilavuus ja virtauspoikkipinta-alat on skaalattu

Taulukko 3. PKL-koelaitteiston tärkeimmät skaalaus-tekijät. [22]

Suure	Skaalaustekijä
Korkeus	1/1
Tilavuus	1/145
Aika	1/1
Teho	1/145
Maksimipaine	40 bar
Virtausala	1/145

tekijällä 1:145. Korkeuden lisäksi yksifaasivirtauksen virtauspainehäviöt on säilytetty mallilaitosyksikköä vastaavina. Reaktorisydän ja höyrystimet on skaalattu käyttämällä lukumäärältään skaalattua osaa polttoainepuista ja höyrystimen lämmönsiirtoputkista. Tällä saadaan säilytettyä lämmönsiirtoilmioiden kannalta tärkeitä ominaisuuksia. Sydämen maksimiteho on 2,5 MW, eli kymmenen prosenttia mallilaitosyksikön skaalatusta tehosta. Suurin paine PKL:ssä on rajoitettu 40 bariin. Rajoitetusta tehosta ja paineesta johtuen laitteisto soveltuu kuvaamaan erityisesti pikasulun jälkeisiä tapahtumia jäähdytteenmenetysonnettomuudessa. Lopullisessa skaalauksessa ilmiöiden mallintamiselle on annettu alkuperäisen geometrian säilyttämistä suurempi painoarvo. Koelaitteistoa on muutettu alkuperäisestä esimerkiksi kuumien haarojen osalta, kun huomattiin, ettei kaksifaasivirtausta ja siihen liittyviä kerrostumisilmiöitä saada pienehköllä virtauspoikkipinta-alalla kunolla mallinnetuksi. Yksittäisten komponenttien, kuten kuumien haarojen suunnittelussa on haluttu säilyttää Frouden luku

$$Fr = \frac{v^2}{gL}. \quad (18)$$

Koelaitteiston suunnittelussa on käytetty lisäksi erilliskoelaitteistoilla tehtyjen kokeiden tuloksia, joilla on tutkittu tiettyjen ilmiöiden esiintymistä erikokoisissa geometrioissa. Jäähdytteenmenetysonnettomuuksien tutkimista varten on onnetto-

muuden alkuvaihe laskettu tietokoneohjelmalla, jotta on päästy koelaitteiston maksimipaineeseen.

3.3 Laitosyksiköiden Phillippsburg 2, Tsuruga 2 ja Olkiluoto 3 vertailu

Phillippsburg 2 ja Tsuruga 2 ovat työssä käytettävien koelaitteistojen mallilaitosyksiköitä. Olkiluoto 3 on Olkiluotoon rakenteilla oleva laitosyksikkö. Kaikki kolme yksikköä ovat PWR-tyyppiä. Yleinen suuntaus ydinvoimaloiden suunnittelussa on ollut pyrkimys kohti suurempaa yksikkökokoja. Suurempi laitosyksikkökoko mahdollistaa edullisemmän sähköntuotannon. Tätä päälinjausta noudatellen viimeisimpänä suunniteltu Olkiluoto 3 on yksiköistä suuritehoisin. Erot vertailtujen laitosyksiköiden välillä eivät ole dramaattisia kertaluokan eroja, vaan lähinnä tekniikan kehittymisen tuomia parannuksia, joilla on vaikutusta hyötysuhteeseen ja taloudellisuuteen. Kehittyneillä ja yhä tarkemmilla analyysimenetelmillä voidaan perustellusti vähentää laitosyksikön suunnittelussa käytettyjä ylimääräisiä konservatiivisuuksia ja siten parantaa taloudellisuutta. Taulukossa 4 on laitosyksiköiden vertailemiseksi esitetty yksiköiden keskeisiä tietoja.

Eroavaisuuksia yksiköiden väliltä löytyy myös muun muassa turvallisuusjärjestelmistä. Koska tässä työssä tarkastelluissa tapauksissa ei näitä järjestelmiä käytetä, ei näillä eroilla ole työn kannalta merkitystä. Mallilaitosyksiköiden eroavaisuudet välittyvät skaalauksen myötä myös niiden perusteella suunniteltuihin koelaitteistoihin. Tärkeä suure määritettäessä tapahtumien etenemisnopeutta häiriöissä ja onnettomuuksissa on tehon suhde jäähdytteen määrään. Tsuruga 2 -laitosyksikössä on eniten jäähdytettä primääripiirissä ja pienin teho. Esimerkiksi täydellisessä sähkönmenetetysonnettomuudessa, jossa varavoimajärjestelmät eivät käynnisty, kun yhteys sähköverkkoon menetetään, on tilanteen kehittyminen epäsuotuisaksi LSTF:n mallilaitosyksikössä verkkaisinta.

Taulukko 4. Laitosyksiköiden vertailutaulukko. [23, 24]

	Phillippsburg 2	Tsuruga 2	Olkiluoto 3
Laitosyksikön sähköteho	1424 MWe	1160 MWe	1600 MWe
Polttoainenuippuja sydämessä	193	193	241
Polttoaineen määrä sydämessä	103 tHM	89 tHM	128 tU
Nippugeometria	16×16	17×17	17×17
Sydämen keskimääräinen tehotiheys	93 kW/l	104,7 kW/l	90,5 kW/l
Aktiivisen sydämen korkeus	3,9 m	3,65 m	4,2 m
Jäähdytteen määrä primääripiirissä	300 t	345 t	noin 300 t
Kiertopiirien lukumäärä	4	4	4
Jäähdytteen massavirta	67680 t/h	60000 t/h	82800 t/h
Primääripiirin paine	15,5 MPa	15,5 MPa	15,5 MPa
Jäähdytteen sisäänmenolämpötila	291,3 °C	289 °C	295,5 °C
Jäähdytteen ulostulolämpötila	326,1 °C	325 °C	328 °C
Kaupallisen käytön alkuaika	1985	1987	arvio 2012

4 Laitosten ja koelaitteistojen simulointi tietokoneohjelmilla

Tietokoneohjelmat olivat aluksi melko yksinkertaisia ja sisälsivät laskennassa käytettävissä yhtälöissä suuria konservatiivisuuksia. Mallien kehityksen rajoittavana tekijänä on ollut suurelta osin tietokoneiden rajallinen laskenta- ja muistikapasiteetti. Molemmista on tapahtunut voimakasta kehitystä ja malleista voidaan tehdä entistä monimutkaisempia. Laskentakapasiteetin huiman kehityksen lisäksi malleista saadaan yhä tarkempia, sillä ilmiökenttä tunnetaan paremmin vuosikymmeniä kestäneen koetoiminnan ansiosta.

4.1 Termohydrauliikkaohjelmien kehitys ja käyttö

Ensimmäisistä melko yksinkertaisista virtausmalleista on kehitys kulkenut kohti monimutkaisempia ja useampia yhtälöitä sisältäviä malleja. Käytetyistä virtausmalleista yksinkertaisimpia on HEM (Homogeneous Equilibrium Model), jossa virtauksen säilymisytälöitä on kolme. Faasien oletetaan virtausmallissa olevan termisesti tasapainossa ja kulkevan samalla nopeudella. Samalla, kun fyysikaaliset mallit ovat kehittyneet, on pyritty vähentämään yhtälöihin sisäänrakennettuja konservatiivisuuksia. Ohjelmia, jotka laskevat ilmiöitä parhaaseen tietämykseen perustuen ilman laskentaan sisällytettyjä konservatiivisuuksia kutsutaan best estimate -ohjelmiksi. Konservatiivisuuden määrittäminen ei ole aina yksiselitteistä, sillä esimerkiksi viileämmän hätäjähdytysveden parempi reaktorisydämen jäädyttävyyden parempi reaktorisydämen jäädyttävyyden jää toissijaiseksi tekijäksi, jos reaktoripaineastia murtuu kylmäaurasmurtuman vuoksi aiheuttaen vakavan onnettomuuden. Pyrkimys mahdollisimman realistiseen ilmiöiden kuvaukseen ja laitteiden toiminnan mallintamiseen vähentää riskiä tehdä epähuomiossa epäkonservatiivisia oletuksia. Turvallisuusanalyysissä, joilla osoitetaan muun muassa turvallisuusjärjestelmien riittävyttä, huomioidaan konservatiivisuus best estimate -ohjelmia käytettäessä alkuoletuksissa.

Esimerkiksi sydämen lämpöteho voidaan konservatiivisuuden vuoksi olettaa aluksi olevan suurin laitoksen käyttöehdoissa sallittu. Tässäkin tapauksessa on tarkoin harkittava onko konservatiiviseksi ajateltu oletus todella konservatiivinen. Suurempi sydämen teho saattaa esimerkiksi hidastaa paineen alenemisnopeutta, jolloin ei välttämättä saavuteta pahinta mahdollista tilannetta onnettomuuden kannalta. Korkeampi primääripiirin paine voi estää boorittoman sekundääripiirin veden pääsyn primääripiiriin höyrystimen lämmönsiirtoputkien rikkouduttua. Booriton sekundääripuolen vesi voisi kulkeutuessaan reaktoriin aiheuttaa reaktiivisuus-onnettomuuden.

Nykyisissä laskentaohjelmissa on yleisesti käytössä kuusiyhtälömalli, jossa säilymisytälöt kirjoitetaan kahdelle faasille, vedelle ja höyrylle, erikseen. Samalla, kun laskentateho on tietokoneiden kehittymisen myötä kasvanut, on mallinnuksessa käytettävien laskentakoppien eli noodien lukumäärä kasvanut. Pyrkimys tarkempaan mallintamiseen on tuomassa kolmessa dimensiossa tapahtuvan laskennan virtauslaskentaohjelmista myös laitosmalleihin, joissa yleisesti käytetään yksidimensioista laskentaa. Useamman dimension käyttö laskennassa lisää laskentakoppien määrää. Samalla ilmiöitä kuvaavat yhtälöt tulevat monimutkaisemmiksi. Laskentaohjelmissa käytetään yleisesti yhä pinta-alan ja tilavuuden suhteen keskiarvoistettuja suureita. Kokeellinen toiminta on ollut osa ohjelmien kehittämistä ja luotettavuuden arvioimista termohydrauliikkaohjelmien alkuajoista lähtien. Erilliskoelaitteistoilla on tehty kokeita empiiristen mallien laatimiseksi laskentaohjelmiin. Integraalikoelaitteistojen tuloksia käytetään samaisten ohjelmien kelpoistamiseen, kun halutaan tutkia piirin kokonaiskäyttäytymistä.

Numeerisen virtauslaskennan (CFD) ohjelmilla voidaan tiettyjä ongelmia tutkia voimalaitosmalleja tarkemmin. CFD-ohjelmat laskevat tarvittaessa

kolmiulotteisesti monimutkaisissakin geometri-
oissa kokonaisia järjestelmiä mallintavia ohjelmia
paremmalla resoluutiolla virtausta, lämmönsiirtoa
ja sekoittumista. Tarkempi resoluutio vie kuitenkin
huomattavasti enemmän laskentakapasiteettia ja
muistitilaa, jolloin laajojen järjestelmien laskemi-
nen pitkällä tarkasteluajoilla on CFD-ohjelmilla
epäkäytännöllistä. Numeerisen virtauslaskennan
ohjelmat soveltuvat toistaiseksi hyvin käytettä-
väksi esimerkiksi erilliskoelaitteistojen tulosten
analysoimiseen ja paineastian sisäisten virtausten
mallintamiseen. Tiettyjä turvallisuuden kannalta
tärkeitä ilmiöitä varten on kehitetty erillisiä CFD-
ohjelmia. Tyypillisiä CFD-ohjelmilla tarkasteltuja
ilmiöitä ovat muun muassa erilaiset sekoittumisi-
lmiöt. Näillä ohjelmilla voidaan tutkia esimerkiksi
vedyn sekoittumista suojarakennuksessa vakavissa
onnettomuuksissa sekä kylmän hätäjähdytysveden
sekoittumista alasmenotilassa ja kiertopiireissä.

Laskentaohjelman käytöllä eli ohjelman käyt-
täjän ja mallin laatijan tekemillä valinnoilla on
vaikutusta saataviin tuloksiin. Laskettaessa pitkä-
kestoisia häiriöitä, voi pienikin eroavaisuus lähtö-
arvoissa aiheuttaa häiriön myöhemmissä vaiheissa
selvästi erilaista käyttäytymistä. Häiriö voi kestää
useita päiviä. Ohjelmissa on usein mahdollista vali-
ta mallia luodessa, mitä virtausmallia laskennassa
käytetään. Yksinkertaisen virtausmallin etuna on
laskennan nopeus. Joissakin vähemmän kokonai-
suuden kannalta tärkeissä kohteissa yksinkertai-
sella virtausmallilla saavutetaan riittävä tarkkuus
ja laskentaa voidaan nopeuttaa valitsemalla niihin
yksinkertaisempi virtauksen laskentatapa. Virtaus-
mallin valinta vaikuttaa laskennan nopeuteen ja
tarkkuuteen. Väärin valittu virtausmalli vääristää
tuloksia.

Järjestelmää kuvaavaa mallia luodessa määri-
tellään useita epävarmoja suureita, kuten hyötys-
uhteita, lämmönsiirtokertoimia ja virtausvastuksia.
Reunaehtojen määrittäminen laskentaa varten on
tehtävä huolellisen harkinnan jälkeen, sillä väärin
asetetut reunaehdot tekevät laskennan tuloksista
pahimmillaan harhaanjohtavia tai yksinkertaisesti
hyödyttömiä. Oikeiden ja perusteltujen arvojen
käyttö laskennassa vaatii kokemuksen lisäksi
hyvän ymmärryksen mallissa käytettävistä fysikaal-
lisista kuvauksista ja laskennan vajavuuksista. In-
tegraalilaitteistoa tai voimalaitosyksikköä kuvaavat
mallit ovat laajoja ja käyttäjän määriteltävissä on
suuri joukko laitteiden tilaa määritteleviä suureita

ja reunaehtoja, jolloin mahdollisuuksia virheellisen
syötteen esiintymiselle on paljon. Virheellinen syöte
voi päätyä laskentaan monella tapaa. Lähtötiedot
voivat olla virheellisiä, lähtötietoja voidaan tulkita
väärin tai voi tapahtua näppäilyvirhe tietoja syö-
tettäessä. Huolellisuudella, tarkastamalla syötetyt
arvot ja käyttämällä useita lähteitä voidaan virhei-
den määrää karsia. Riittävä dokumentaatio mallin
käytössä tehdyistä valinnoista ohjaa tekemään
perusteltuja ratkaisuja ja helpottaa tulosten oikeaa
tulkintaa.

Usein laskentaohjelmien korrelaatioiden ke-
hittämisessä tarvittavat mittaukset suoritetaan
stationääritilassa, sillä tarkka mittaus dynami-
sissa tilanteissa parametrien muuttuessa nopeasti
on hankalaa. Näiden tulosten pohjalta tehtyjä
korrelaatioita käytetään kuitenkin laskemaan
dynaamista käytöstä. Ei ole täysia takeita sille, et-
teivätkö muuttuvat olosuhteet vaikuta lopputulok-
seen. Erityisesti kaksifaasivirtauksen mittauksen
haasteellisuus ei kuitenkaan juuri salli muunlaista
lähestymistapaa. [5]

Virheettömyyteen laskentaohjelmien käytössä ei
pidä luottaa. Monimutkaista mallia käytettäessä on
virheiden mahdollisuus huomioitava myös tuloksia
tarkastellessa. Parhaiten virheiden määrää saa-
daan karsittua ohjelmien huolellisella käytöllä. [25]
Huolelliseen käyttöön sisältyy myös tulosten yksi-
tyiskohtaisuuksiin asti ulottuva tarkastaminen ja
ymmärtäminen. Usein laskentaohjelman puutteet
havaitaan tuloksia tutkimalla, joista löytyvät epä-
johdonmukaisuudet paljastavat puutteita. Joskus
oikeaksi lopulta todettu järjenvastaiseksi tulkittu
tulos saattaa auttaa löytämään uusia ilmiöitä
ja ymmärtämään järjestelmää ja laskentamallia
paremmin.

4.2 Apros

Apros (Advanced PROcess Simulator) on Valtion
teknillisen tutkimuskeskuksen ja Fortumin yh-
teistyössä vuodesta 1986 lähtien kehittämä simu-
lointiympäristö. Tässä diplomityössä on käytetty
Aprosin versiota 5.07. Aprosilla voidaan mallintaa
termohydrauliikan ja kemiallisten prosessien lisäk-
si muun muassa automaatiojärjestelmiä. Aprosia
käytetään ydintekniikan lisäksi mm. paperiteolli-
suuden prosessien mallintamiseen. Tässä diplomi-
työssä käytetyt simulointimallit on tehty VTT:ssä
(Valtion teknillinen tutkimuskeskus). Kaikissa
työssä käytetyissä malleissa on käytetty kuusiyh-

tälömallia termohydrauliikan laskennassa. Apros lukeutuu edellisessä kappaleessa esitettyihin best estimate -ohjelmiin. Aprosissa on mahdollista valita termohydrauliikan mallintamistapa komponentti-kohtaisesti yksinkertaisesta virtauksen ratkaisusta laskennaltaan raskaampaan kuusiyhtälömalliin. Yksinkertaisen ratkaisun etuna on nopeus, monimutkaisemman mallinnuksen antaessa tarkempia tuloksia. Aprosien käyttämässä kuusiyhtälömallissa muuttujina ovat paine, aukko-osuus, faasien entalpiat sekä faasien nopeudet. Faasien vuorovaikutus on kuvattu kitka- ja lämmönsiirtokorrelaatioilla.

Aprosia käytetään Process Visionin valmistaman graafisen käyttöliittymän Gradesin kautta. Järjestelmiä kuvaavat kokonaisuudet rakentuvat Gradesin sivuista eli niin kutsutuista verkoista, joihin on kuvattu komponenteista muodostuvia osajärjestelmiä. Yksi verkko voi sisältää esimerkiksi yhden kiertopiirin, tai kuvata höyrystimen yhdyslinjoinen. Erilaisia komponentteja on Aprosissa valmiina suuri määrä. Aprosissa, kuten useissa muissakin vastaavissa ohjelmissa, on automaattisesti säätyvä laskennan aika-askel. Tämä tarkoittaa sitä, että ohjelma lyhentää automaattisesti käytettävää aika-askelta, kun suureiden muutosnopeus kasvaa. Laskenta siirtyy käyttämään pidempää aika-askelta, kun muutokset ovat vähäisiä. Käyttäjä voi myös rajoittaa käytettäväksi lyhyemmän aika-askelen, mikä tosin hidastaa laskentaa. Joissain tapauksissa on aika-askel määrättävä lyhyeksi, jotta laskenta onnistuisi. Tällaisia tapauksia ovat nopeita muutoksia järjestelmän tilassa aiheuttavat tapahtumat, kuten suuren jäähdytteenmenetyssonnettomuuden ulospuhallusvaiheen alkaminen. Oman rajoituksensa aika-askelen pituudelle asettaa laskennassa käytettävien noodien koko. Noodin läpi aika-askeleessa kulkevan virtaavan aineen määrä ei saisi olla suuri suhteessa noodin tilavuuteen. Tästä johtuen koelaitteiston mallissa saatetaan joutua käyttämään pienempää aika-askelta kuin laitosmallissa. Oikean suuruisen aika-askelen valinta vaatii kokemusta.

Aprosia voidaan käyttää graafisen käyttöliittymän lisäksi myös antamalla käskyjä tekstimuotoisena komentoikkunaan. Yleisimmin käytettäviä käskyjä ovat modi, set ja do. Varsin käytännöllinen tapa laskemiselle on kirjoittaa ajotiedosto. Ajotiedosto on komentoikkunaan kirjoitettavien käskyjen jono, joka tallennetaan tekstimuotoisena tiedostoon. Ajotiedostossa voidaan määrittää esimerkiksi jär-

jestelmien vikaantumisia sekä venttiilien asentoja laskennan kuluessa. Apros voidaan lisäksi määrätä tekemään välitallennus cwrite-käskyllä. Välitallennuksen avulla voidaan palata tallennuskohtaan cread-käskyllä. Välitallennuksen avulla ei ole tarvetta laskea koko laskua alusta asti uudelleen, mikäli havaitaan laskennan epäonnistuneen. Mallin käytön voisi toteuttaa valmiin ajotiedoston sijaan myös automatiikkakomponenteilla. Tällöin sydämen lämpötilan kohoaminen tietyn raja-arvon yli lopettaisi jäähdytteen vähentämisen ja aloittaisi jäähdytteen lisäämisen.

4.2.1 Apros-laskentamallit PKL, LSTF ja EPR

Tämän työn Apros-laskuissa käytettiin kolmea laskentamallia. Mallit saatiin käyttöön valmiina, eikä varsinaista mallintamista tarvinnut juuri tehdä muutamia kokeeseen liittyviä lisäyksiä lukuun ottamatta. Kukin laskentamalli tuli ajaa tarkasteltavaa koetta varten uuteen alkutilaan siitä tilasta, jossa ne saatiin käyttöön. Kaikissa malleissa oli kuvattuna primääripiiri höyrystimeen sekä osa höyrylinjoista. Kahdessa mallissa höyrystin oli mallinnettu useiden eri komponenttien avulla. PKL-mallissa höyrystimen kuvauksessa oli käytetty valmiita komponentteja. Mallien käyttämisestä ja saaduista tuloksista on kerrottu enemmän seuraavassa luvussa.

Tässä diplomityössä käytetty PKL-laskentamalli koostuu kahdestatoista laskentaverkosta, joihin on kuvattu koelaitteisto sekä useita automaatiojärjestelmiä. [26] Laskentamalli oli ajettuna aluksi eri koetta vastaavaan alkutilaan ja primääripiirissä oli runsaasti tyypeä. Lauhtumattomat kaasut piti saada pois järjestelmästä ja ajaa malli tutkittavaa koetta vastaavaan alkutilaan. Kiertopiirin saaminen tyypettömäksi ja ajaminen tässä työssä analysoidun kokeen alkutilaan vaati runsaasti työtä.

Japanilaisen LSTF-koelaitteiston malli koostuu yhdeksästä verkosta joihin on kuvattu primääripiirin lisäksi osa sekundääripuolen höyryputkistoa. Automatiikkaa on mallinnettu melko laajasti ja niiden avulla saadaan mallinnetuksi useita turvallisuustoimintoja. Koelaitteiston turvallisuusjärjestelmistä on mallinnettu muun muassa paineakut ja matalapaineinen hätäjäähdytysjärjestelmä. Reaktori on mallinnettu kolmella rinnakkaisella komponentilla. [27]

EPR-malli on varsin laaja ja mallintaa Olkiluotoon rakennettavaa ydinvoimalaitosyksikköä ja

sen automaatiojärjestelmiä. Mallia voi luonnehtia alustavaksi Olkiluoto 3 -malliksi. Laitosyksikkö on kuvattu 47 laskentaverkolla, joista suurin osa on primääripiiriä kuvaavia verkkoja. Höyrystimien mallinnuksessa ei eripituisia lämmönsiirtoputkia

ole mallinnettu erikseen. Tästä syystä höyrystimien käyttäytymisestä vähennetyllä primääripiirin massainventaarilla ei käyttyädy realistisesti, eikä höyrystimen lämmönsiirtoputkien pinnankorkeuksista saa oikeaa kuvaa.

5 Kokeen simulointi

Työssä laskettiin seuraavassa kappaleessa esitetty koe läpi Apros-laskentaohjelmalla. Kokeen tuloksia laskentatuloksiin vertaamalla saadaan kuvaa siitä kuinka hyvin laskentaohjelma pystyy toistamaan kokeessa esiintyviä ilmiöitä. Koe laskettiin läpi myös kahdella muulla Apros-mallilla. Seuraavissa kappaleissa on esitetty laskentojen kulku ja tulokset pääpiirteissään. Tarkemmin laskentojen tuloksia on esitetty liitteissä olevissa kuvissa.

5.1 PKL-koe

Työssä käytettiin PKL-kokeen F1.2 ”Inherent Boron Dilution due to Reflux-Condenser Conditions as a Function of the Primary Coolant Inventory (RCS Pressure: 12 bar)” tuloksia. PKL-koelaitteistolla Saksassa joulukuussa 2004 suoritettu koe oli niin kutsuttu parametrikoe. Kokeessa primääripiirissä olevan jäähdytteen määrää muutettiin askelmaisesti ja tutkittiin sen aiheuttamia muutoksia luonnonkiertoon ja boorin laimenemiseen. Boorikonsentraatioita mitattiin jatkuvatoimisilla mittareilla sekä ottamalla näytteitä kiertopiiristä. Primääripiirin paine pidettiin vakiona kokeen ajan säatelemällä sekundääripuolen painetta. Höyrystimien pinnankorkeus pyrittiin pitämään likimain vakiona, mutta pinnankorkeus vaihteli maltillisesti kokeen aikana. Pinnankorkeus säilyi kuitenkin koko laskennan ajan höyrystimien lämmönsiirtoputkien yläpuolella. Jäähdytteen määrää vähennettiin kunnes sydämen lämpötilat lähtivät kasvuun. Tämän jälkeen jäähdytteen määrää kasvatettiin askelmaisesti. Jäähdytteen määrää ei kokeessa kasvatettu alkuperäistä inventaaria vastaavaksi. Kun primäärijäähdytettä oli lisäämättä 980 kilogrammaa, varioitiin kokeessa primääripainetta ja sydämen tehoa. Koe oli suunniteltu PWR-tyyppisen (Pressurized Water Reactor) voimalaitoksen luonnonkierron ja boorin laimenemisen tutkimiseen. [28]

Booria käytetään PWR-tyyppisissä voimalaitoksissa primääripiirin veteen liuenneena reaktorin reaktiivisuuden säätöön. Painevesireaktori voi tulla kriittiseksi, vaikka säätösauvat ovat sydämessä, jos jäähdyte on riittävän vähäboorista ja sen lämpötila riittävän matala. Reaktiivisuuden kasvuun riittää sydämen läpi kulkeutuva vähän booria sisältävän veden tulppa. Vähäboorisen vesitulpan muodostumisen syitä voivat olla vähäboorisen veden syöttäminen primääripiiriin tai pienen jäähdytteenmenetyssonnettomuuden aikana tapahtuvan puhtaan lauhteen muodostuminen höyrystimiin. Pieni jäähdytteenmenetyssonnettomuus voidaan määritellä pääkiertopiirin suurimman putken poikkipinta-alasta tiettyä osuutta pienemmäksi vuodoksi. Pientä jäähdytteenmenetyssonnettomuutta voidaan ajatella myös vuodoksi, joka on niin pieni, että primääripiirin jäähdyttämiseen tarvitaan höyrystimiä. Höyrystimiä tarvitaan, kun primääripiiristä ei poistu riittävästi energiaa vuotoon. Pieni jäähdytteenmenetyssonnettomuus on kuitenkin niin suuri, että normaali lisävesijärjestelmä ei kykene kattamaan vuodossa menetettävää jäähdytettä. Jos primääripiirin syötöt eivät riitä kompensoimaan vuotoa, alkaa jäähdytteen määrä primääripiirissä vähentyä. Pääkiertopumput pysähtyvät onnettomuuden alussa tapahtuvan pikasulun yhteydessä. Pääkiertopumppujen pysähtyttyä lämpö siirtyy sydäimestä luonnonkierrolla. Reaktorisydämessä onnettomuuden aikana muodostuva booriton höyry lauhtuu höyrystimissä. Osa vähäboorisesta lauhteesta palaa kiertopiirin kuumaa haaraa pitkin takaisin reaktoripaineastiaan, osan kertyessä kylmään haaraan. Kylmä haara muodostaa U-kirjaimen muotoisen vesilukon pääkiertopumpun ja höyrystimen välille. Kylmän haaran vesilukkoon kertynyt vähän booria sisältävä vesi voisi kulkeutua tulppana reaktorisydämeen. Booriton vesi absorboi

booripitoista vettä vähemmän fissioita aiheuttavia neutroneita, joten sydämen reaktiivisuus lähtee kasvuun. Riittävän suuren boorittoman veden tulpan aiheuttama äkillinen tehopiikki voi vaurioittaa polttoainetta [20]. Todennäköisesti ainakin osa boorittoman veden tulpasta sekoittuu booripitoisempaan veteen ennen päätymistään reaktorisydämeen. Sekoittuminen ennen sydämeen päätymistä tapahtuu alasmenotilassa ja reaktoripaineastian alatilassa.

5.2 Kokeen simuloiminen Apros-malleilla

Aprosilla lasketut tapaukset mukailivat pääpiirteisään PKL-koelaitteistoilla suoritettua koetta F1.2. Kokeessa lopuksi suoritettuja paineen ja tehotason variointeja ei tässä työssä laskettu, eikä huomioitu muutenkaan. Laskennassa primääripiirin jäähdytteen määrää lisättiin siten, että se vastasi alkutilaa laskennan lopuksi. Tällä saatiin paremmin esiin erot tyhjennyksen ja täytön välillä.

Malleilla laskettaessa ei tarkoituksena ollut orgaanisesti seurata laskennassa alkuperäisen kokeen kulkua, vaan saada tutkittavat ilmiöt esiin. PKL-koetta mukailevasti laskettiin PKL-mallin lisäksi vastaava jäähdytteen portaittain vähentäminen ja lisääminen läpi myös LSTF- ja EPR-mallilla. Kokeen laskemista varten skaalattiin muun muassa primäärijäähdytteen uloslasku- ja syöttönopeus sellaiseksi, ettei se aiheuttanut suurta häiriötä primääripiirin paineeseen. Eroavaisuus uloslaskunopeudessa aiheutti myös eroja tasaantumisaikoihin. Suuremmat kiertopiirit reagoivat häiriöihin hitaammin. Koska virtausten annettiin tasaantua stationääriseen tilaan aina jäähdytteen määrän muutoksen jälkeen, ei itse muutosnopeudella ollut suurtakaan vaikutusta. Kerralla uloslaskettavan jäähdytteen määrä ei vastannut alkuperäistä PKL-koetta. Laskennassa jäähdytteen määrän muutos valittiin siten, että sydämen lämpenemiseen johtavien uloslaskujen lukumäärä tuli kohtuulliseksi. PKL-kokeessa kerralla uloslaskettu vesimäärä ei ollut vakio, vaan se vaihteli uloslaskusta toiseen. Piiriin syötettävä vesimäärä vaihteli vastaavasti. Laskennassa kerralla uloslaskettavan jäähdytteen määrä oli vakio, alun muutamaa poikkeusta lukuunottamatta.

Sydämen teho skaalattiin LSTF- ja EPR-laskuja varten vastaamaan PKL-koetta. Tehon suhteen tilavuuteen haluttiin olevan laskuissa sama kuin

PKL-koelaitteistolla suoritettussa kokeessa. Kun tämä suhde saatiin laskettua PKL-koelaitteiston arvoilla, voitiin ratkaista yhtälöstä

$$\frac{P_{PKL}}{V_{PKL}} = \frac{P_{LSTF}}{V_{LSTF}} = \frac{P_{EPR}}{V_{EPR}} \quad (19)$$

teho kullekin järjestelmälle. Yhtälöstä 19 saatiin EPR-mallin sydämen jälkilämpötehoksi 82,27 MW ja LSTF-koelaitteiston kokeenaikaiseksi tehoksi 1,46 MW. EPR:n skaalattu teho vastaa 1,9 prosenttia sydämen täydestä termisestä tehosta. LSTF-koelaitteistolle laskettu teho vastaa 1,8 prosenttia mallilaitoksen termisestä tehosta. PKL-koelaitteistossa kokeessa käytetty teho oli 0,6 MW, mikä vastasi 2,5 prosenttia mallilaitosyksikön sydämen termisestä tehosta. Erot prosentiosuuksissa täysistä termisistä tehoista johtuvat pääosin EPR:n ja koelaitteistojen mallilaitosyksiköiden tehojen ja tilavuuksien suhteiden välisistä eroista.

Mallinnettavan kokeen alkutilanteessa primääripiirin paine oli 12 baria. Primääripiirin paine mitattiin Apros-laskuissa sydämen yläpuolelta PKL-mallilla laskettua koetta vastaavasti. Mallit ajettiin laskentaa varten alkutilaan siten, että mallin tila vastasi pääpiirteisään koelaitteiston stationääristä lähtötilaa kokeen alussa. Tarpeettomat järjestelmät otettiin pois laskennasta. Esimerkiksi hätäjäähdytysjärjestelmää ei laskennan aikana tarvittu. Koska koe suoritettiin luonnonkierrolla, kytkettiin pääkiertopumppujen automatiikka pois ja pumpit asetettiin pois päältä. Primääripiirin jäähdytteen määrä pyrittiin saamaan lähelle PKL-kokeen mukaista arvoa. Jäähdytteen booripitoisuus LSTF-mallissa poikkesi muista, joissa booripitoisuus oli noin 2000 ppm. LSTF-laitteistossa käytetään booritonta vettä. LSTF-laskentamallissa primääripiiriin on kuitenkin mallinnettu booria sisältävää vettä. Laskentamalleihin lisättiin laskennan suorittamiseksi automaatiokomponentteja ja venttiileitä jäähdytteen määrän muuttamiseksi hallitusti kokeen aikana.

Alkutilassa primääripiirissä sydämen tuottama teho kulkeutui luonnonkierrolla sekundääripiiriin. Primääripiiri oli kokonaisuudessaan vesifaasisa. Paineistin oli erotettuna primääripiiristä ja paineen säätäminen tapahtui höyrylinjan virtausta säätämällä. Kokeen aikana jäähdytteen määrää vähennettiin portaittain ja annettiin laitteiston hakeutua vakaaseen tilaan vähennysten välillä. Jäähdytteen vähenemisen seurauksena reaktoris-

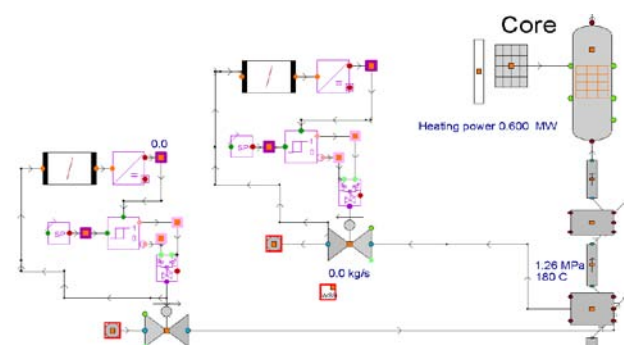
sa alkoi muodostua höyryä, joka alensi kuumissa haaroissa olevan veden tiheyttä ja kiihdytti luonnonkiertoa. Kokeen aikana havaittu suurin luonnonkierron massavirta esiintyi tällaisen kaksi-faasiluonnonkierron aikana. Höyryn lauhtuminen höyrystimissä parantaa lämmönsiirtoa verrattuna vesifaasin lämmönsiirtoon. Paremman primääripuolen lämmönsiirron takia sekundääripiirin painetta tulee kasvattaa höyrynkehityksen alkaessa primääripiirissä. Sekundääripiirin paineen kasvu heikentää sekundääripuolen lämmönsiirtokerrointa, jolloin parempi lämmönsiirto primääripuolella kumoutuu ja primääripaine pysyy vakiona. Kun jäähdytteen vähentämistä jatkettiin, vaihtui kuumissa haaroissa virtaus höyryvirtaukseksi. Höyry lauhtui höyrystimissä ja osa jäähdytteestä palasi vetenä kuumia haaroja pitkin takaisin reaktoriin. Kun jäähdytettä vähennetään primääripiiristä riittävästi, ei sydämen jäähdytys riitä poistamaan reaktorin tehoa ja sydämen lämpötila lähtee kasvuun. Jäähdytteen lisääminen primääripiiriin pysäyttää lämpötilojen kasvun. Ilmiöt, jotka esiintyivät jäähdytettä vähennettäessä, toistuvat jäähdytettä portaittain lisättäessä. Erona jäähdytteen vähentämisen ja lisäämisen välillä on se, että vähennettäessä primääripaine pyrkii pienenemään ja lisättäessä suurenemaan.

5.3 Laskenta PKL-mallilla

Laskennan suorittamiseksi PKL-malli tuli aluksi ajaa koetta vastaavaan alkutilaan. Paineistin erotettiin muusta primääripiiristä ja tasapainotila haettiin ilman paineistimen käyttöä. Paineen pitämiseksi laskennan aikana vakiona ilman paineistimen apua lisättiin Apros-malliin höyrylinjan kuristusventtiilille ohjain. Primääripiirin paineen mukaan säätävällä venttiilillä kuristettiin höyryn virtausta höyrystimistä. Höyryvirtauksen kuristaminen vaikuttaa suoraan sekundääripiirin paineeseen. Sekundääripiirin paine vaikuttaa höyrystimien lämmönsiirtoon, joka vaikuttaa suoraan primääripiirin paineeseen. Sekundääripuolen painetta tulee korottaa kokeen aikana, kun lämmönsiirto paranee höyrystimessä primääripuolella tapahtuvan lauhtumisen seurauksena. Jos sekundääripuolen paine pysyisi vakiona lämmönsiirron lisääntyessä, jäähtyisi primääripiiri liikaa ja paine primääripiirissä lähtisi laskuun. Primääripiirin paine pyrittiin pitämään vakiona laskennan aikana. Lämmönsiirto höyrystimissä paranee olennaisesti, kun primää-

ripiiriin alkaa muodostua höyryä. Höyrystimissä primääripuolella lauhtuva höyry siirtää tehokkaasti lämpöä primääripiiristä sekundääripiiriin. Kokeilemalla löytyi säätäjään sopivat parametrit, joilla primääripiirin paine pysyi likimain vakiona. Syöttövesi höyrystimiin tulee laskennasta poistetusta pisteestä. Laskennasta poistetulle pisteelle on määriteltävissä koko laskennan ajan vakiona säilyvät veden ominaisuudet. Tällainen piste käyttäytyy kuten ääretön homogeeninen säiliö. Höyrystimien syöttöveden lämpötilaksi asetettiin 120 °C. Syöttöveden virtauksen määrittävä venttiili säätyy höyrystimen pinnankorkeuden mukaan. Pinnankorkeuden tulee kokeen ajan säilyä höyrystimien lämmönsiirtoputkien yläpuolella tasaisen lämmönsiirron varmistamiseksi.

Jäähdytteen vähentäminen askelmaisesti primääripiiristä mallinnettiin lisäämällä malliin venttiili ja sitä ohjaava automatiikka, sekä laskennasta poistettu piste. Venttiili yhdistää primääripiirin laskennasta poistettuun pisteeseen. Laskennasta poistetun pisteen paine oli alempi kuin primääripiirin paine, jolloin primääripiirin ja pisteen yhdistävän venttiilin avautuminen sai jäähdytteen virtaamaan pois primääripiiristä. Jäähdytettä poistettiin sydämen alapuolella olevasta noodista, jotta uloslaskun aiheuttama häiriö kiertopiirien symmetriseen toimintaan olisi mahdollisimman vähäinen. Laskennan jälkimmäisellä puoliskolla tehtävää booriveden syöttämistä varten mallinnettiin uloslaskua vastaava automatiikka venttiileineen. Jäähdytteen lisääminen tapahtui samaan kohtaan sydämen alapuolelle kuin uloslaskukin. Primääripiiriin syötettävä vesi saatiin uloslaskua vastaavasti laskennasta poistetusta pisteestä, joka kuvasi vakiopaineista boorivesisäiliötä. Kuvassa 1 on esitetty malliin jäähdytteen määrän muutoksia



Kuva 1. Jäähdytteen vähentämiseksi ja lisäämiseksi PKL-malliin tehdyt muutokset.

varten lisätyt komponentit ja niiden sijoittuminen sydämen alapuolelle. Primääripiiristä poistetun ja sinne lisätyn jäähdytteen määrä saatiin määriteltä kyseessä olevan venttiilin massavirran aikaintegraalista. Aikaintegraalia varten on Aprosissa oma komponenttinsa, jota käytettiin määrittämään venttiilin läpi kulkeneen jäähdytteen määrä. Malliin lisätty moottorikäyttöinen venttiili avautui, kun ajotiedostossa annettu asetusarvo oli suurempi kuin venttiilin läpi kulkenut vesimäärä. Uloslaskettava ja laskennan loppupuoliskolla piiriin syötettävä jäähdytteen määrä asetettiin ajotiedostossa modi-käskyllä. Venttiili sulkeutui, kun piiristä tai piiriin oli laskettu asetusarvon mukainen määrä jäähdytettä. Ajotiedostoon kirjoitetun, edeltä määrätyn suunnitelman mukaan avautuvat ja sulkeutuvat venttiilit automatisoivat jäähdytteen määrän muutokset. Koe voitiin ajaa ajotiedoston avulla kokonaisuutena läpi ilman tarvetta puuttua kokeen aikana laskennan kulkuun.

Kokeen ajaminen alkutilaan tilasta, jossa se oli saatu käyttöön, aiheutti haasteita. Malli oli aluksi ajettuna toisen kokeen alkutilaan, joka poikkesi melko suuresti halutusta. Suurimmat haasteet aiheutti primääripiirissä oleva typpi, joka piti saada kokonaisuudessaan pois järjestelmästä. Lauhtumattomilla kaasulla on vaikutusta järjestelmän lämmönsiirto-ominaisuuksiin, eikä typen haluttu häiritsevän laskentaa ja vääristävän tuloksia. Typpi saatiin primääripiiristä asettamalla kahteen pisteeseen toisistaan eroavat vakioiksi määritetyt paineet. Korkeampipaineeseen pisteeseen asetettiin typen osuudeksi nolla. Paine-ero sai aikaan virtauksen pisteiden välillä oleviin primääripiirin osiin, jolloin typpi poistui piiristä matalampipaineisemman laskennasta poistetun pisteen kautta. Ajettaessa mallia alkutilaansa piirit kolme ja neljä käyttäytyivät luonnonkierrolla poikkeavasti. Höyrystimissä huomattiin olevan eroavaisuuksia, kun tutkittiin, mistä syystä piirit eivät käyttäydy samalla tavoin. Kiertopiireissä yksi ja kaksi olevien höyrystimien poikkeavat arvot SG13_SEPAR_TUBE_LENGTH(1) ja SG13_SEPARATOR_HEIGHT(1) asetettiin vastaamaan kiertopiireissä kolme ja neljä käytettyjä arvoja. Muutoksen jälkeen piirien käytös oli yhdenmukaisempaa. Tehdyistä muutoksista huolimatta alkutilan saavuttaminen vei paljon laskenta-aikaa.

Luonnonkiertoa varten PKL-mallissa on kylmään haaraan mallinnettu koelaitteistossa oleva

Taulukko 5. PKL-kokeen alkutilan arvoja.

Primääripiirin paine	12 bar
Reaktorin teho	0,6 MW
Primääripiirin massainventaari	2500 kg
Sydämen ulostulolämpötila	184 °C
Höyryn paine höyrystimissä	7 bar
Booripitoisuus primääripiirissä	2000 ppm

venttiili, joka kuvaa painehäviötä pääkiertopumpujen ollessa pysäytettynä. Painehäviöt ovat koelaitteistossa ja mallissa pienemmät kuin mallilaitoksessa ilman venttiilien aiheuttamia lisäkuristuksia. Kuristusventtiilin avulla massavirrat eivät kasva epärealistisen suureksi luonnonkierrolla. Kuristusventtiilit määriteltiin laskennassa kuitenkin aukioleviksi, sillä luonnonkierrolla massavirrat kiertopiireissä asettuivat oikeaksi tässä asennossa. Mallin kuristusventtiilissä oli määriteltynä virtausvastus myös venttiilin ollessa auki. Virtausvastus riitti rajoittamaan luonnonkiertoa. Venttiilin säätäminen pienemmälle virtaukselle aiheutti ongelmia. Piireissä kolme ja neljä alkutilan saavuttamista häirtäsi lämpötilan lasku höyrystimien kylmäkollektoria vastaavassa noodissa. Lämpötilan lasku ilmeni kuristusventtiilien ollessa osittain kiinni. Lämpötilan lasku johtui ristikkäisistä virtauksista höyrystimen lämmönsiirtoputkissa, jolloin kylmältä puolelta pääsi palaamaan viileämpää (noin 150 °C) jäähdytettä kuumalle puolelle. Tämä alensi höyrystimen sisäänmenonoodin lämpötilaa ja heikensi luonnonkiertoa piireissä 3 ja 4. Taulukossa 5 on esitetty PKL-kokeen alkutilan arvoja, jotka ovat samoja kuin laskennan alkutilassa.

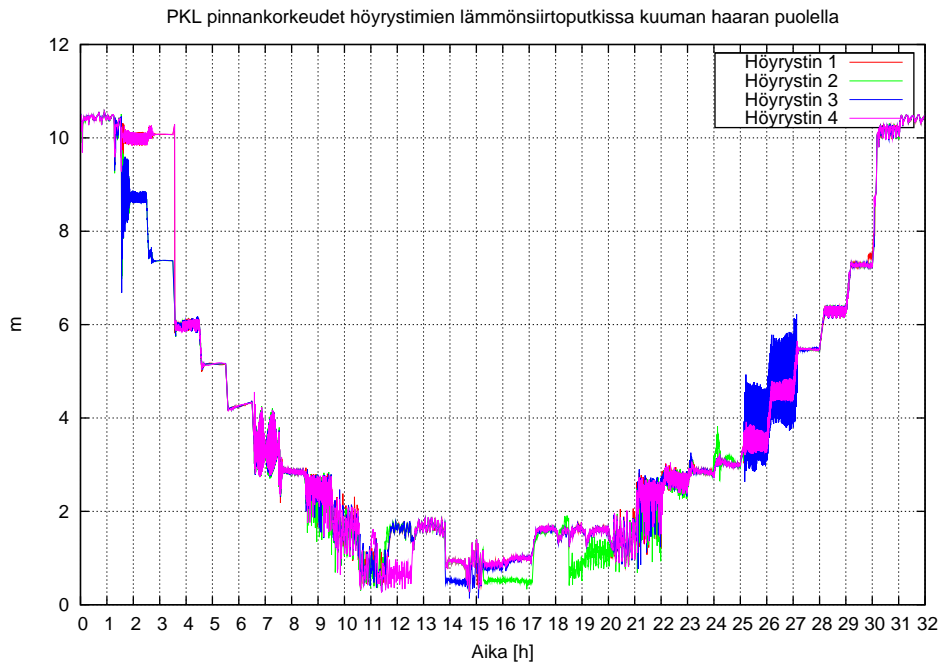
Primääripiirin paine saatiin pysymään melko hyvin 12 barissa koko laskennan ajan, paitsi aivan kokeen alussa ja lopussa. Kokeen alussa ja lopussa jäähdytteen määrä on suurimmillaan. Primääripiirissä olevan jäähdytteen määrän ollessa suurimmillaan vaikuttavat jäähdytteen määrän muutokset selvästi myös primääripiirin paineeseen. Pienemmällä jäähdyteinventareilla primääripiirissä oleva höyry tasaa paineenmuutoksia. Ensimmäiset jäähdytteen vähennykset tehtiin laskennassa pienemmin askelin, jottei primääripiirin paine putoaisi liikaa. Primääripiiristä laskettiin askelmaisesti vettä tunnin välein 0,3 kg/s massavirralla. Kerralla jäähdytettä vähennettiin 100 kg. Jäähdytettä vähennettiin tästä poiketen aluksi kuudesti 50 kg kerralla.

Massavirrat kiertopiireissä ovat yksifaasiluon-

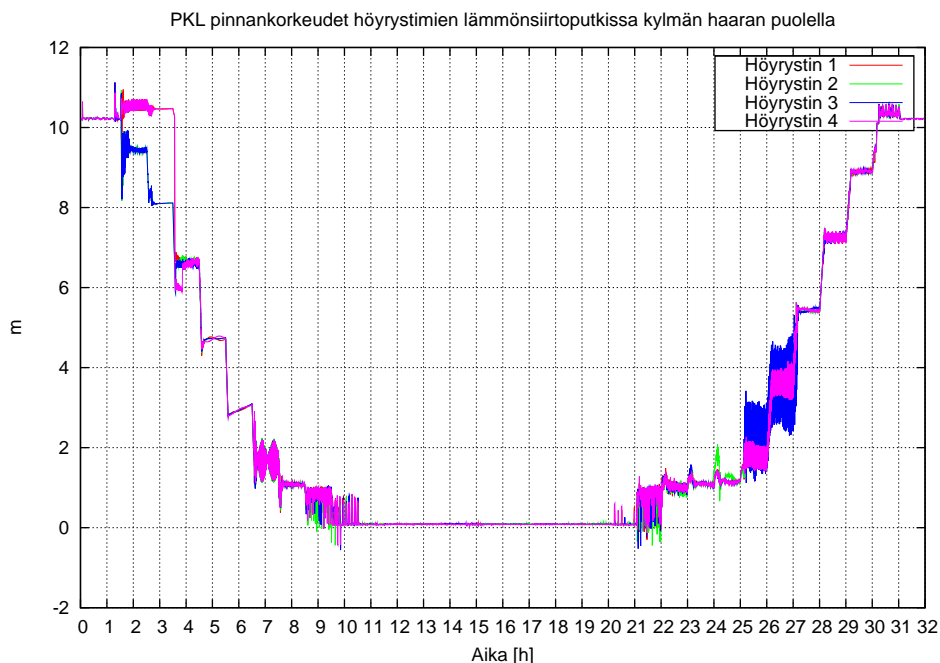
nonkierrolla 1,5 kg/s. PKL-kokeessa vastaava massavirta oli noin 1,25 kilogrammaa sekunnissa. Kun primääripiiristä vähennettiin jäähdytettä, alkoi sydämessä muodostuva höyry kiihdyttää luonnonkiertoa, joka kävi laskennassa kuumissa haaroissa suurimmillaan yli 4 kg/s uloslaskun aikana. Tasoittumisen jälkeen massavirta vaihteli välillä 3–3,5 kg/s. Tällöin höyrystimien 2 ja 3 lämmönsiirtoputkissa pinnankorkeudet lähtivät

laskuun. Pinnankorkeudet laskivat noin metrin. Höyrystimien 1 ja 4 lämmönsiirtoputkien pinnankorkeudet lähtivät laskuun seuraavan jäähdytteen vähentämisen yhteydessä. Pinnankorkeudet höyrystimien lämmönsiirtoputkissa kokeen aikana näkyvät kuvissa 2 ja 3. Kuvissa nollassa on putkien alareunan korkeudella.

Erot höyrystimien lämmönsiirtoputkien pinnankorkeuksien välillä tasoittuivat massavirtojen



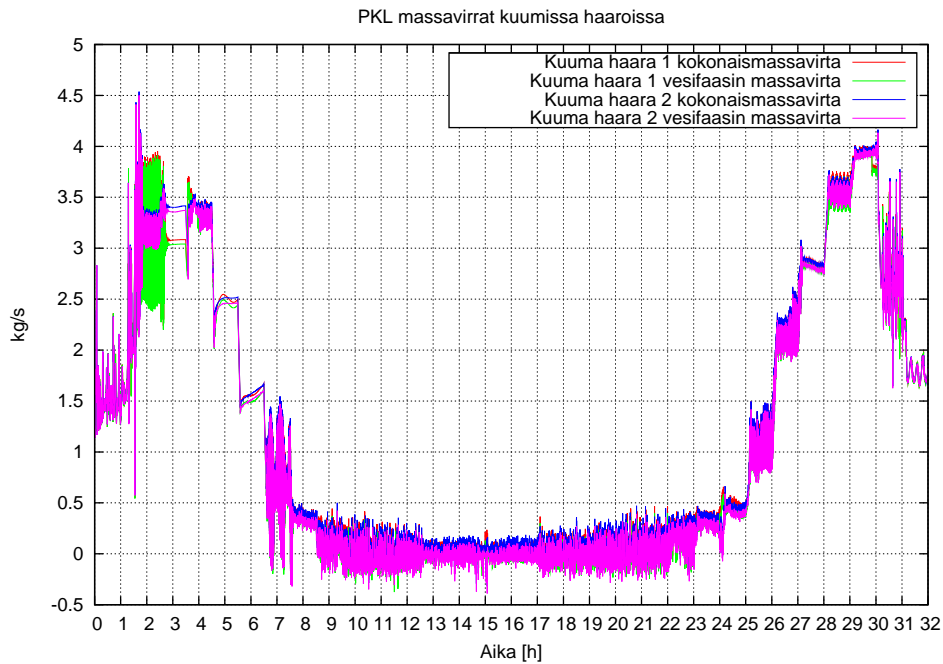
Kuva 2. PKL-laskennan aikaiset höyrystimien lämmönsiirtoputkien pinnankorkeudet kuuman haaran puolella.



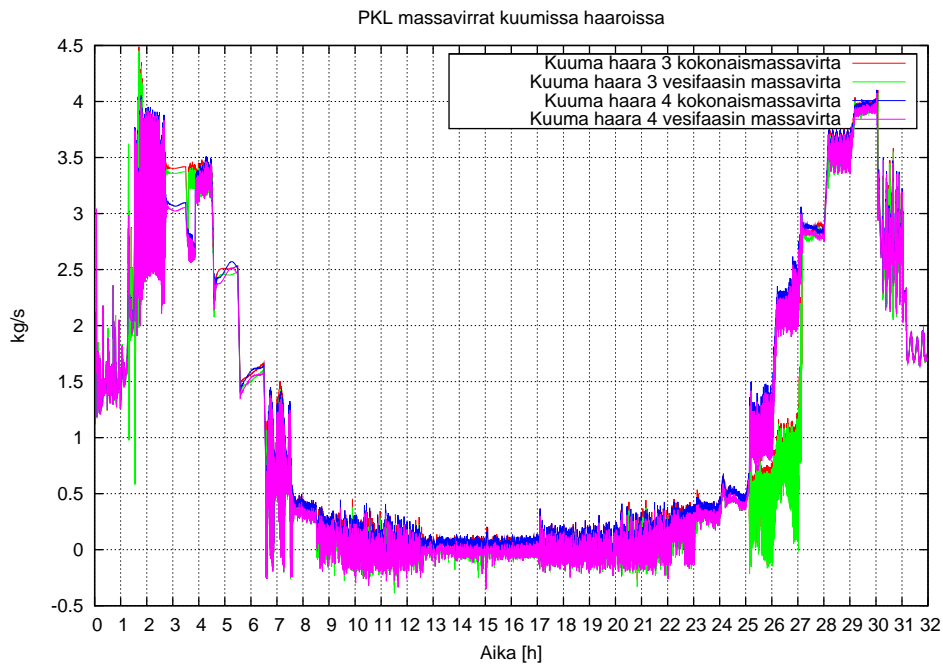
Kuva 3. PKL-laskennan aikaiset höyrystimien lämmönsiirtoputkien pinnankorkeudet kylmän haaran puolella.

kääntyessä laskuun. PKL-kokeessa suurin mitattu massavirran arvo oli noin 3,5 kg/s. Laskennassa suurimman massavirran aikana kuumen haaran höyrystintä edeltävässä noodissa aukko-osuus oli 20 prosenttia. Samalla aukko-osuudella esiintyi maksimimassavirta myös täyttövaiheessa. Suurimman massavirran aikana höyrystimien lämmönsiirto-putkien pinnankorkeudet olivat laskeneet yhdestä neljään metriä ylimmästä arvostaan. Maksimi-

massavirralla höyry kiihdytti kierto-putkissa olevan veden kiertoa. Kun höyrin määrä uloslaskujen myötä lisääntyy, kasvaa virtausnopeus kierto-putkissa. Massavirrat kääntyivät lopulta laskuun, kun jäähdytteen määrää vähennettiin edelleen. Koska höyry on tiheydeltään murto-osa veden tiheydestä, ei kasvanut virtausnopeus näy massavirran kasvuna. Kuvissa 4 ja 5 on esitetty kierto-putkien massavirrat kokeen aikana.



Kuva 4. PKL-laskennan aikaiset massavirrat piirien 1 ja 2 kuumissa haaroissa.

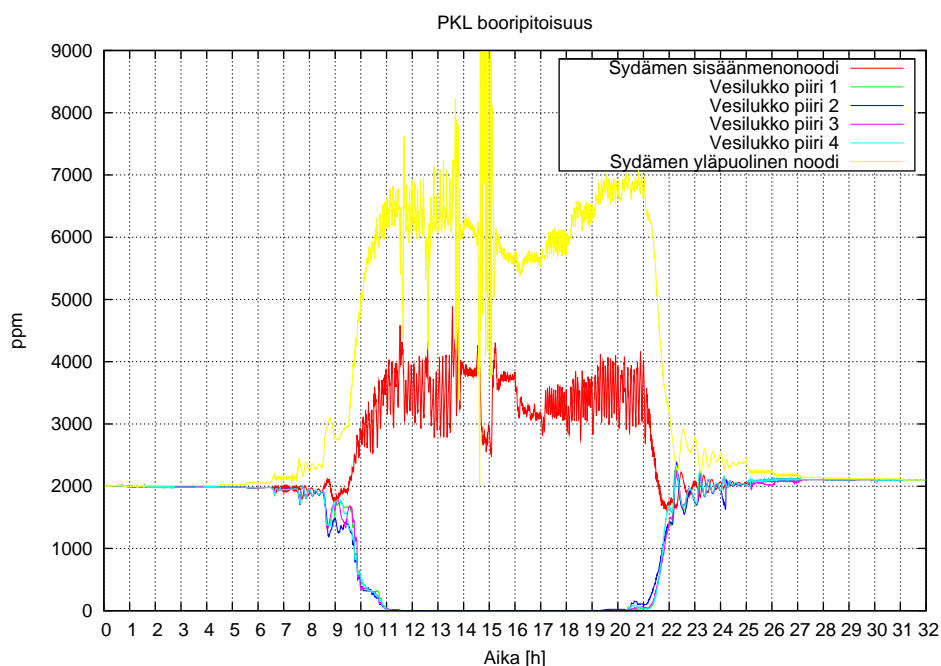


Kuva 5. PKL-laskennan aikaiset massavirrat piirien 3 ja 4 kuumissa haaroissa.

Booripitoisuus lähti loivaan laskuun kylmän haaran vesilukossa, kun höyrystimien lämmönsiirtoputkissa kylmän haaran puoleinen kollapsipinta oli enää noin metrin putkien alareunan yläpuolella. Pinnankorkeus vaihteli voimakkaasti ja kävi välillä lämmönsiirtoputkien alareunassa vesilukon puolella. Massavirta kiertopiireissä oli tällöin painunut alle kilogrammaan sekunnissa. Vettä kuitenkin kulkeutui höyryn mukana kuumissa haaroissa pulssimaisesti. Välillä virtaus kääntyi kuumissa haaroissa hetkellisesti kokonaan kohti reaktoripaineastiaa. Vesilukkoon muodostui lopulta boorittoman veden tulppa. Booritonta vettä alkoi kertyä vesilukkoihin kiihtyvällä tahdilla höyrystimien kylmän haaran puoleisten lämmönsiirtoputkien kollapsipinnan saavutettua pysyvämmin putkien alareunan. Osa höyrystimissä lauhtuneesta vedestä palasi yhä takaisin reaktorin suuntaan, kun osa vedestä kertyi vesilukkoihin. Reaktorisydämessä booripitoisuus kasvoi kolminkertaiseksi veden kiehuessa ja poistuessa reaktorista höyryfaasissa. Höyryn mukana ei kulkeudu booria. Reaktoriin kulkeutui lisää booria kylmistä haaroista tulevan veden mukana. Kuvassa 6 on esitetty booripitoisuuksia eri puolilla primääripiiriä laskennan aikana.

Sydämen lämpötilat lähtivät kasvuun, kun primääripiirin jäähdytteestä oli tyhjennysvaiheen lopuksi jäljellä noin kolmasosa. Jäähdytettä oli tällöin vähennetty 1700 kilogrammaa ja aikaa kulunut 15 tuntia. Kolmoshöyrystimen sekundääri-

puolen pinnankorkeus lähti laskuun hieman ennen sydämen kuumenemistä. Pinnankorkeuden lasku johtui lisääntyneestä lämmönsiirrosta kyseisessä kiertopiirissä. Kun yhdestä höyrystimestä meni suurempi osa tehosta sekundääripuolelle, väheni muiden höyrystimien lämmönsiirto vastaavasti. Syytä yhden piirin erkanemiselle muiden käytöksestä ei saatu selville. Höyryn massavirta kakkoshöyrystimestä kasvoi täyttymisvaiheen alettua. Tapahtui vastaavanlainen erkaneminen muiden piirien käytöksestä kuin kolmospiirissä ennen sydämen lämpötilojen nousua. Höyrystimien sekundääripuolen pinnankorkeudet laskennan aikana on esitetty kuvassa 7. Booripitoisuudet alkoivat nousta vesilukoissa, kun jäähdytettä oli lisätty 600 kilogrammaa. Reaktoriin kertynyt boori alkoi sekoittua muualle primääripiiriin ja muutaman jäähdytteen lisäyksen jälkeen primääripiirin booripitoisuudet olivat tasoittuneet lähes alkuperäiselle tasolle. Boorin sekoittuminen primääripiirissä käynnistyi vesilukkojen pinnankorkeuden saavuttaessa höyrystimien puolelta lämmönsiirtoputkien alareunan. Jäähdytteen virtaussuunta kiertopiireissä vaihteli, kun jäähdytettä oli lisätty alle puolet poistetusta määrästä. Pääosin virtaus tapahtui kuitenkin alkuperäiseen suuntaan. Virtaukset rauhoittuivat, kun jäähdytettä oli lisätty 900 kilogrammaa ja vesilukko täyttyi myös pumpun puolelta. Jäähdytteen lisääminen kasvatti massavirtoja kiertopiireissä. Höyry kuljetti vettä aluksi mukanaan pisaroina höyryst-



Kuva 6. PKL-laskennan aikaiset booripitoisuudet eri puolilla primääripiiriä.

timiin, eikä höyryn ja veden vastakkaissuuntaista virtausta esiintynyt. Aluksi höyrystimien käytös ei ollut yhdenmukaista. Kolmoshöyrystimessä kaksifaasiluonnonkierron alkaminen ja massavirtojen kasvu lähti verkkaisimmin käyntiin. Kuvissa 5 ja 7 näkyy hyvin kolmospiirin eroava käytös aikavälillä 25–27 tuntia.

Piirien eroavasta käytöksestä johtuen kolmoshöyrystimen kautta kulki kahden täytön ajan vähemmän tehoa sekundääripiiriin kuin muiden. Tilanne tasoittui, kun primääripiiriin lisättiin jäähdytettä, jolloin kolmospiirin massavirta saavutti muiden piirien massavirrat. Sekundääripiirin paine lähti lopuksi laskuun, kun höyrystimien lämmönsiirtoputket olivat täyttyneet vedellä ja primääripiirissä ei enää ollut juurikaan höyryä. Lisää kuvia PKL-laskennan tuloksista on esitetty liitteessä 1.

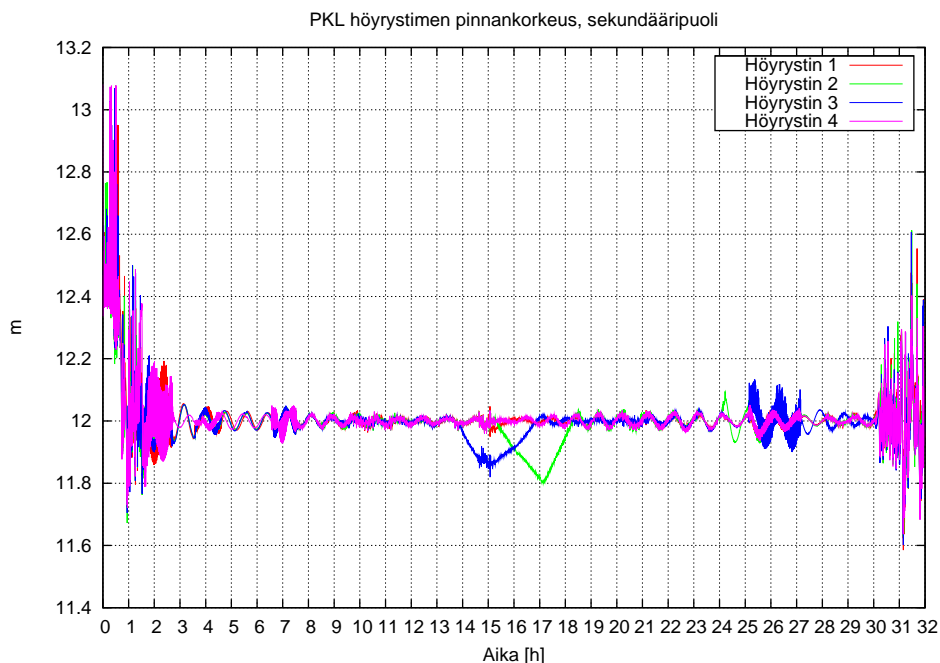
5.3.1 PKL-kokeen ja -laskennan vertailu

PKL-mallilla suoritettujen laskennan tulokset vastasivat pääpiirteissään koelaitteistolla suoritettujen kokeiden tuloksia. Selkeää poikkeamaa koetuloksien ja laskettujen tulosten välillä tärkeimmissä parametreissa ei ollut havaittavissa. Laskennassa saatiin esille samat ilmiöt kuin kokeessa. Laskenta ja koe eivät olleet ajallisesti yhtenevät. Kokeesta poiketen laskennassa jäähdytteen määrän muutokset tehtiin tasaisesti tunnin välein. Laskennassa maksimimasavirta kaksifaasiluonnonkierrolla ylitti kokeen

massavirran kilogrammalla sekunnissa. Tulosten vertailussa todettu hyvä vastaavuus laskennan ja koetulosten välillä antaa varmuutta Aprosilla laskemisen antavan oikeansuuntaisia tuloksia. Tekemällä tällaisia vertailuja voidaan paremmin varmistua laskentaohjelman kyvystä laskea oikein. Taulukossa 6 on vertailtu koelaitteiston ja mallin tuloksia eri inventaareilla.

Taulukossa 6 tarkastelluissa kohdissa, joissa esiintyy selvä muutos parametreissa, on lasketun inventaarin arvon ja kokeessa mitatun jäähdytteen määrän erotus alle 100 kilogrammaa. Poikkeuksena on jäähdyteinventari, jolla vesilukkojen booripitoisuus lähti voimakkaaseen laskuun. Eroavaisuudet laskennan ja kokeen välillä ovat melko vähäisiä. Primääripiirissä olevan jäähdytteen määrän muutokset tehtiin laskennassa alkua lukuun ottamatta 100 kilogramman portaissa, jolloin sataa kilogrammaa voidaan pitää laskennan tulosten tarkastelutarkkuutena. Tyhjennys- ja täyttövaiheiden eroja ei voitu tarkastella kokeellisen datan perusteella, sillä PKL-kokeessa täyttövaihetta ei jatkettu alkupe räiseen jäähdyteinventariin saakka. Laskennasta saatuja täyttymisvaiheen loppupuolen tuloksia ei myöskään voida verrata kokeen tuloksiin.

Laskennassa kuumissa haaroissa massavirta vesifaasissa oli 1,5 kg/s ja kokeessa 1,25 kg/s. Vähäistä epästabiilia käytöstä esiintyi sekä kokeessa että laskennassa. Suurimmaksi osaksi oskillointi tapahtui kaksifaasiluonnonkierrolla, jolloin höyry



Kuva 7. PKL-laskennan aikaiset höyrystimien pinnankorkeudet.

Taulukko 6. Tapahtumien esiintymisinventaarien vertailutaulukko.

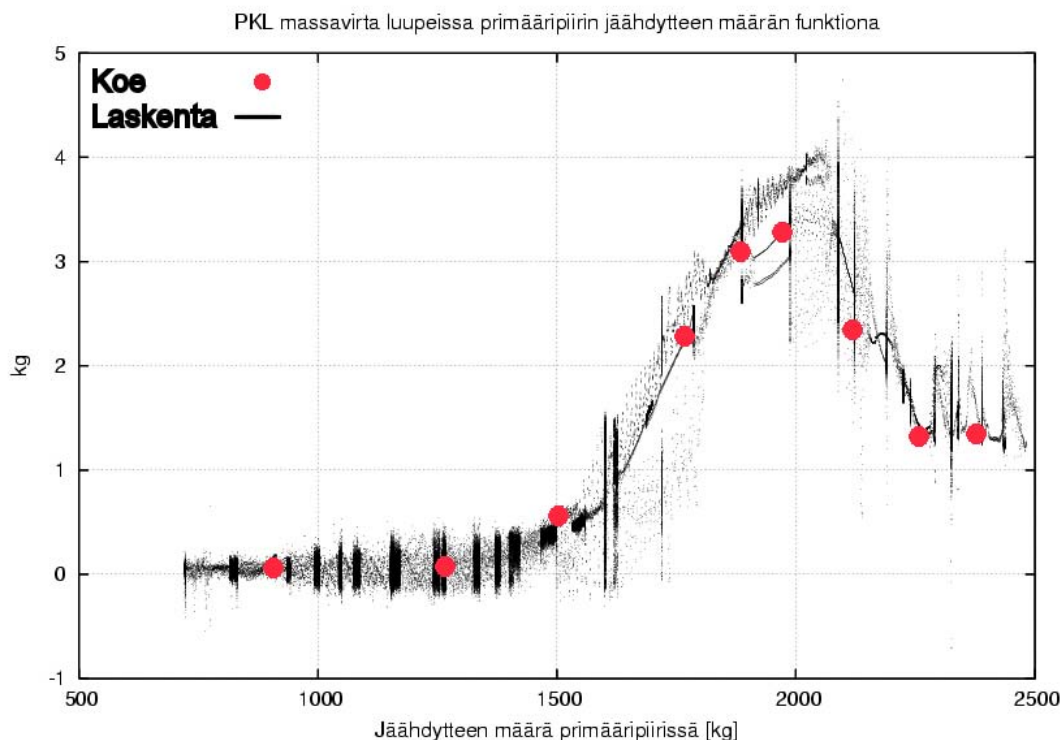
Ilmiö tai tapahtuma	PKL-koelaitteiston inventaari [kg]	Apros PKL-mallin inventaari [kg]	Erotus [kg]
Alkutila	2500	2484	16
2-faasiluonnonkierron alku, luonnonkierron voimistuminen	2110	2170	-60
Suurin (stabiili) virtaus kiertopiireissä	1990	2066	-76
Massavirrat vähentyneet arvoon 1,2 kg/s	1600	1660	60
Booripitoisuus vesilukoissa lähtee voimakkaaseen laskuun	1120	1265	-145
Pienin jäähdytteen määrä, sydämen lämpeneminen	670	700	-30
Booripitoisuus vesilukoissa lähtee voimakkaaseen kasvuun	1280	1330	-50
Massavirrat lähtevät uudelleen kasvuun täyttövaiheessa	1520	1500	20
Massavirta saavuttaa maksimiarvonsa täyttövaiheessa	-	2022	-

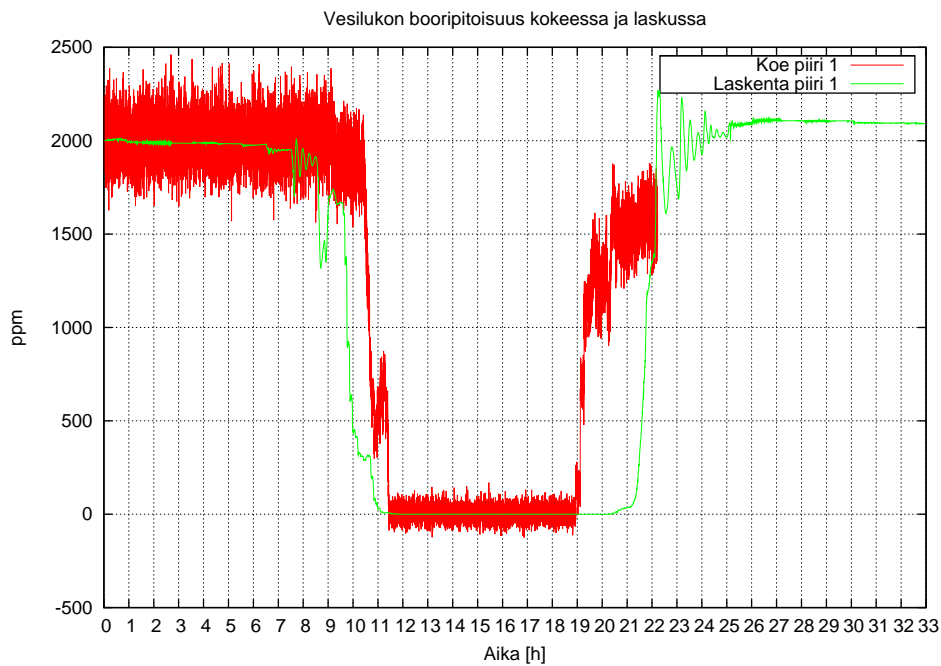
kiihdytti veden virtausta putkistossa. Kuvassa 8 on merkitty punaisilla ympyröillä PKL-kokeen massavirtoja eri jäähdyeinventareilla. Laskennan massavirrat jäähdytteen määrän mukaan on merkitty mustilla pisteillä. Kuvassa näkyvät laskennan tulosten pystyviivat muodostuvat kohtiin, joissa primääripiirin jäähdytteen määrä pysyi vakiona uloslaskuja tai syöttöjä seuraavissa tasaantumisvaiheissa. Massavirta vaihteli kiertopiirien hakeutuessa uuteen tasapainotilaan, joka näkyy kuvassa massavirran voimakkaana vaihteluina kyseisellä jäähdytteen määrällä.

Booripitoisuuden aleneminen vesilukoissa kesti kokeessa ja laskennassa noin 2000 sekuntia. Boori-

pitoisuutta mitattiin PKL-koelaitteistossa jatkuvatoimisilla mittareilla kolmessa piirissä vesilukkojen höyrystimen puoleisilla pystysuorilla osuuksilla. Yhdessä piirissä booripitoisuutta mittaava laite oli sijoitettu vesilukon pumpun puoleiselle pystysuoralle osuudelle. Booripitoisuus voitiin mitata myös muista osista primääripiiriä ottamalla näytteitä ja analysoimalla ne. Booripitoisuudet laskennan ja kokeen aikana on esitetty kuvassa 9. Kuvassa esitetyt kokeen aikaiset booripitoisuudet oli mitattu jatkuvatoimisella booripitoisuusmittarilla vesilukon höyrystimenpuoleisesta pystysuorasta putkesta.

Ajallisesti booripitoisuuden muutokset eivät ole yhtenevät johtuen uloslaskujen ja syöttöjen eroista.

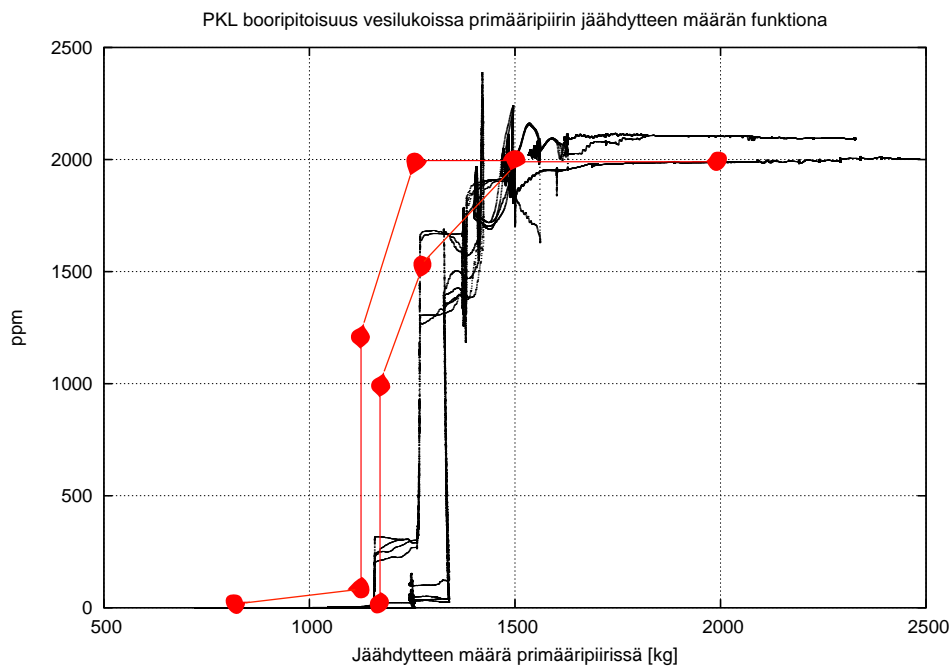
**Kuva 8.** PKL-kokeen ja laskennan aikaiset kiertopiirien massavirrat jäähdytteen määrän mukaan.



Kuva 9. PKL-kokeen ja laskennan aikaiset booripitoisuudet piirin 1 vesilukossa.

Kuvasta kuitenkin havaitaan booripitoisuuden muutosnopeuden olevan samaa suuruusluokkaa. Kuvassa 10 on esitetty booripitoisuudet kokeessa ja laskennassa jäähdytteen määrän mukaan piirin 1 vesilukossa. Kokeessa booripitoisuuksien muutokset vesilukoissa tapahtuivat laskentaa pienemmällä jäähdytteen määrällä.

Kokeen aikana mitattuja piirin 1 vesilukon booripitoisuuksia on kuvassa 10 esitetty punaisilla ympyröillä. Kuvassa on laskennan aikaisia kaikkien piirien vesilukkojen booripitoisuuksien keskiarvoa kuvattu mustalla viivalla. Booripitoisuudet muuttuivat sekä laskennassa että kokeessa siten, että tyhjennysvaiheessa booripitoisuuden jyrkkä



Kuva 10. PKL-kokeen ja laskennan aikaiset booripitoisuudet jäähdytteen määrän mukaan.

muutos tapahtui täyttövaihetta pienemmällä mas-sainventaarilla. Piirissä on ikään kuin hitautta booripitoisuuden muutoksen suhteen. Tämä on tulkittavissa myös siten, että booripitoisuuksien lähdettyä laskuun onnettomuustilanteessa primääripiiriin täytyy jäädytettä lisätä jonkin raja-arvon ylittävä määrä booripitoisuuden laskun pysäyttämiseksi ja kääntämiseksi kasvuun. Vesilukkojen laimenemisen pysäyttävä jäähdytemäärä riippuu laitteistosta. Höyrystimien lämmönsiirto-putkien tyhjeneminen tapahtui sekä laskussa että kokeessa siten, että kuuman haaran puoleinen kollapsipinta oli koko ajan vesilukon puoleisen kollapsipinnan yläpuolella.

5.4 Laskenta LSTF-mallilla

LSTF-koelaitteistomallilla laskettiin PKL-koetta vastaava tapahtumasarja. Laskennan alkupuoliskolla vähennettiin primääripiirissä olevan jäädytteen määrää askelmaisesti. Kun sydämen lämpötilat lähtivät kasvuun, aloitettiin jäädytteen askeleittainen lisääminen. LSTF-koelaitteiston tuloksista erityisen kiinnostavia tekee muista poikkeava jäädytyspiirien lukumäärä. Koelaitteistossa on kaksi kiertopiiriä ja ne on skaalattu vastaamaan mahdollisimman hyvin neljää kiertopiiriä. Kiertopiirien poikkipinta-ala on muodostunut näin verrattain suureksi. Kahden kiertopiirin laitteisto antaa poikkeavuutensa vuoksi lisäarvoa tehtäville vertailuille. Koelaitteistossa käytetään primääripiirissä booritonta vettä. Koelaitteistossa kylmien haarojen vesilukkojen booripitoisuutta voidaan tarvittaessa arvioida sinne lauhtuneen veden määrän perusteella. Laitteistoa kuvaavassa Apro-mallissa on primääripiiriin kuitenkin mallinnettu booria sisältävää vettä. Muista laskennoista poiketen booripitoisuus primääripiirissä oli laskennan aluksi tuhat ppm. Poikkeava booripitoisuus jäi alkutilaan ajettaessa huomaamatta. Erolla ei uskota juurikaan olevan merkitystä tuloksiin, koska tarkoituksena ei ollut tutkia booripitoisuuksien absoluuttisia arvoja. Booripitoisuudella ei pieninä pitoisuuksina myöskään ole merkitystä lämmönsiirtoon tai virtausten käyttäytymiseen.

Kokeen laskemista varten malliin piti tehdä muutoksia ja ajaa se alkutilaan. Pääkiertopumput ja niitä ohjaava automatiikka kytkettiin pois päältä, koska kokeessa mallinnettiin luonnonkiertoa. Paineakkujen venttiilit suljettiin ja otettiin pois laskennasta. Tämä oli tarpeen, sillä kokeenaikainen

primääripiirin paine oli matalampi kuin paineakkujen venttiilien avautumis-paine. Paineakuista tuleva jäädyte olisi haitannut alkutilan saavuttamista. Primääripiirin paineesta tai liian korkeasta sydämen lämpötilasta tuleva pikasulkusignaali estettiin ottamalla signaalin määrittävät pisteet pois laskennasta. Näille laskennasta poistetuille pisteille annetun vakioarvon avulla sydämen teho asetettiin 1,46 MW:iin. Malliin asetettu sydämen lämpöteho saatiin määriteltyä PKL-kokeen perusteella lasketusta teho-tilavuussuhteesta kappaleessa 5.2 esitetyn yhtälön 19 mukaisesti. Mallissa on kuvattuna paljon lämpörakenteita, joihin varastoitunut lämpöenergia hidasti alkutilan saavuttamista. Lämpörakenteiden lämpötilan piti antaa hakeutua termiseen tasapainoon jäädytteen kanssa. Lämpörakenteiden annettiin mallissa tasaantua alkutilaa vastaavaksi laskemalla alkutilaa vastaavassa stationääritilassa useiden tuntien ajan.

PKL-kokeen alkutilaa vastaava jäädytteen massa LSTF-laitteistossa laskettiin olevan noin 6000 kg. Tämä tulos saatiin laskemalla PKL-kokeen alkutilan primäärijäädytteen keskimääräinen tiheys ja kertomalla saatu tiheys LSTF-koelaitteiston primääripiirin tilavuudella. Apro-mallin primääripiirin jäädytteen määrää mittaava komponentti antoi epäjohdonmukaiselta vaikuttavia arvoja, eikä sen antamaa lukuarvoa käytetty määräävänä tekijänä alkutilan hakemisessa. Komponentin laskentaa ei korjattu. Alkutila haettiin käyttämällä paineistinta apuna. Alkutilassa primääripiirin paine vastasi PKL-kokeen painetta ja jäädyte oli vesifaasissa. Alkutilan varmistamiseksi tarkasteltiin lämpötiloja eri puolilta primääripiiriä ja verrattiin niitä PKL-kokeen alkutilaan. Lämpötilat olivat yhtenevät sydämen ulostulossa sekä kiertopiireissä. Alkutila arvioitiin saavutetuksi, kun malli saavutti stationääritilan, jossa paineet ja lämpötilat olivat yhtenevät PKL-laskennan alkutilan vastaavien suureiden kanssa. Höyrystimien pinnankorkeus sekundääripuolella säätyi mallissa automatiikan ohjaamana 10,3 metriin, jolloin höyrystimen lämmönsiirto-putket olivat veden peittämät. Kuten PKL-koelaitteistolla tehdyssä kokeessa, vaihteli pinnankorkeus höyrystimissä maltillisesti laskennan aikana. Tärkeintä pinnankorkeuden säädössä oli säilyttää höyrystimien lämmönsiirto-putket veden peittäminä mahdollisimman tasaisen lämmönsiirron varmistamiseksi. Taulukossa 7 on esitetty LSTF-laskennan alkutilan arvoja.

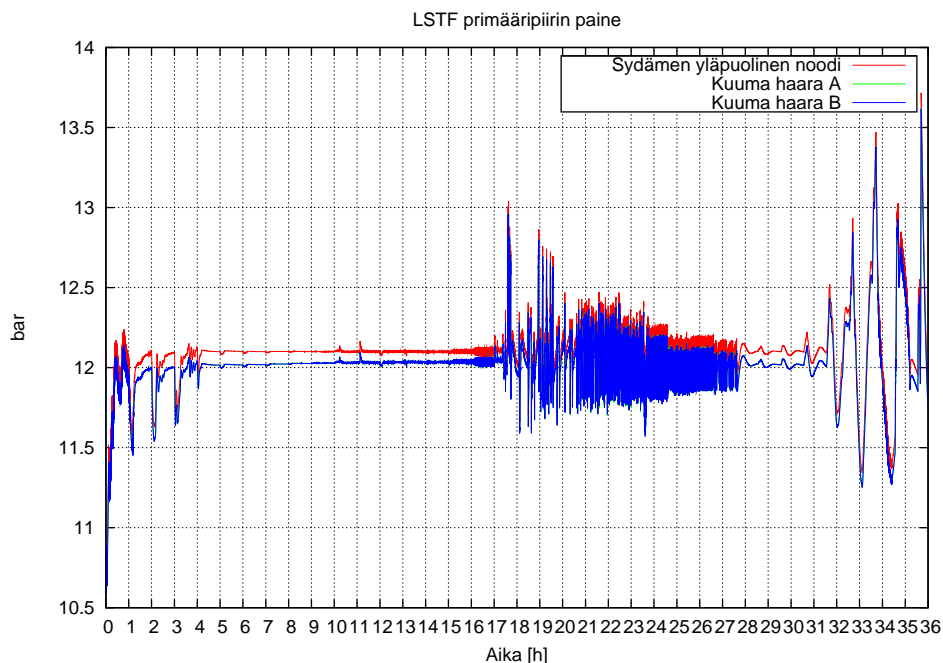
Taulukko 7. LSTF-laskennan alkutilan arvoja.

Primääripiirin paine	12 bar
Reaktorin teho	1,46 MW
Primääripiirin massainventaari	n. 6000kg
Sydämen ulostulolämpötila	182 °C
Sekundääripiirin paine	5,9 bar

Primääripiirin paine pyrittiin säilyttämään laskennan aikana mahdollisimman vakaana 12 barissa. Primääripainetta säädeltiin sekundääripuolelta höyryn ulosvirtausta rajoittamalla samalla tavalla kuin PKL-mallissa. Aluksi kokeiltiin molemmille höyrystimille yhteisen höyrylinjan venttiilin käyttöä. Ensimmäisien ajojen tuloksista huomattiin voimakasta vaihtelua kiertopiirien massavirroissa. Tilannetta saatiin tasaisemmaksi korvaamalla yksi höyrylinjan ulospuhallusventtiili kahdella. Tällöin höyrystimien sekundääripuolet eivät olleet yhteydessä toisiinsa, eikä epästabiilia käyttäytymistä enää esiintynyt aivan yhtä voimakkaasti. Molempia venttiileitä asetettiin ohjaamaan sama automatiikka, jolloin höyrystimien käyttäytymisen oli tyhjennysvaiheessa lähes identtistä. Pri-

määripiirin paineen säätöautomatiikka laadittiin malliin PKL-mallissa käytetyllä tavalla. Kokeen laskemiseen sopivat parametrit painetta säätävään PI-säätimeen löytyivät kokeilemalla, jolloin primääripiirin paine saatiin pysymään likimain 12 barissa. Primääripiirin paine laskennan aikana on esitetty kuvassa 11.

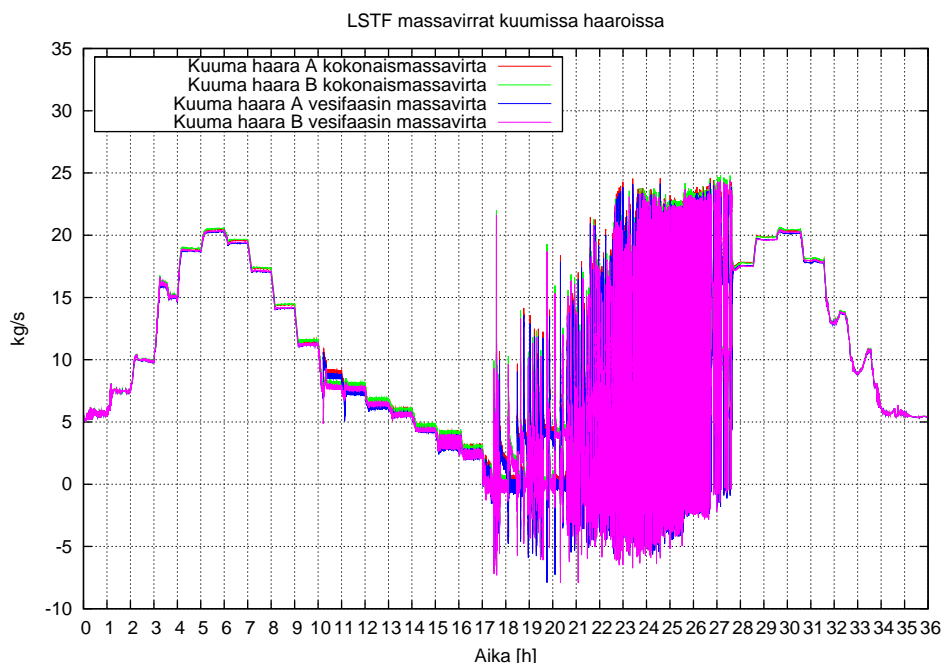
Laskenta käynnistyi alkutilan saavuttamisen jälkeen jäädytteen vähentämisellä primääripiiristä. Jäädytteen uloslaskunopeus oli noin 0,35 kg/s. Laskennan aikana kerralla vähennettiin primääripiiristä kahta poikkeusta lukuun ottamatta 200 kg jäädytettä. Uloslaskettava määrä oli kahdesti 300 kg. Poikkeavaan uloslaskumäärä laskennan alkuvaiheessa auttoi laskennan suorittamisessa. Kahdensadan kilogramman vähennys laskennan aluksi aiheutti voimakasta primääripaineen vaihtelua, joka vaikutti laskennan hidastumiseen ja epävakaana käytöksenä. Kolmensadan kilogramman vähennyksellä paineensäätöautomatiikka toimi paremmin ja laskenta saatiin suoritettua. Jäädytteen vähentäminen aiheutti höyryn kehityksen alkamisen reaktorissa. Sekundääripuolen

**Kuva 11.** LSTF-laskennan aikainen primääripiirin paine.

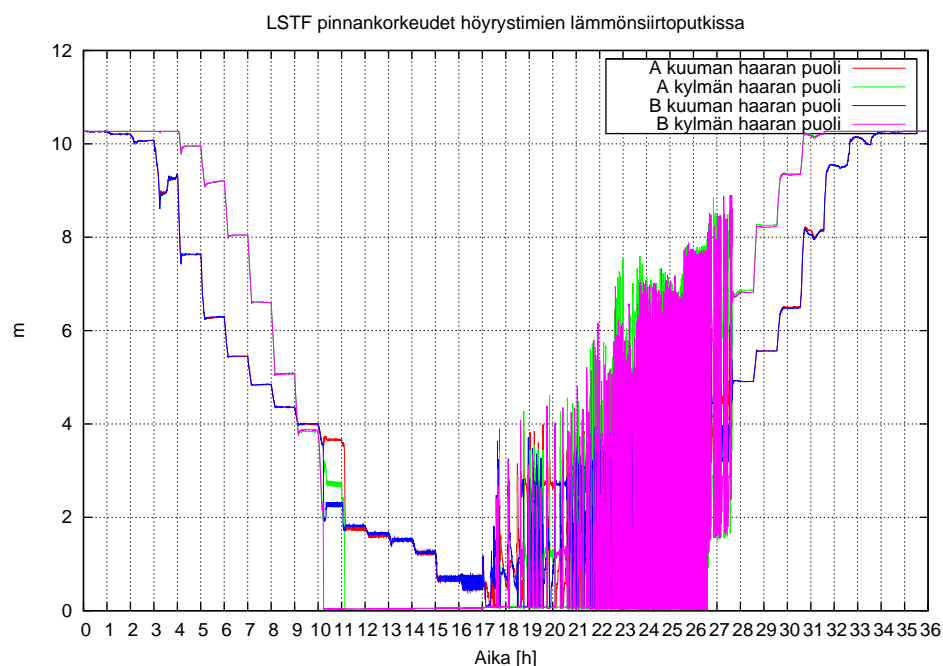
paine lähti automatiikan ohjaamana kasvuun kaksifaasiluonnonkierron käynnistyttyä ja lisättyä lämmönsiirtoa höyrystimissä. Sekundääripiirin paine oli korkeimmillaan 10,7 bar. Korkeimmillaan sekundääripiirin paine oli massavirtojen lähdettyä laskuun kiertopiireissä tyhjennysvaiheen puolivälissä. LSTF-laskennan aikaiset kuumien haarojen massavirrat on esitetty kuvassa 12.

Vesilukkojen pinnankorkeus lähti höyrystimen

puolelta laskuun, kun jäähdytettä oli vähennetty primääripiiristä 2000 kilogrammaa. Seuraavalla vähennyksellä pinnankorkeus B-höyrystimen lämmönsiirtoputkissa kylmän haaran puolella painui nollaan. A-höyrystimen lämmönsiirtoputkien pinnankorkeus saavutti putkien alareunan, kun jäähdytettä oli vähennetty 2400 kilogrammaa. Höyrystimien lämmönsiirtoputkien ja vesilukkojen pinnankorkeudet on esitetty kuvissa 13, 14 ja



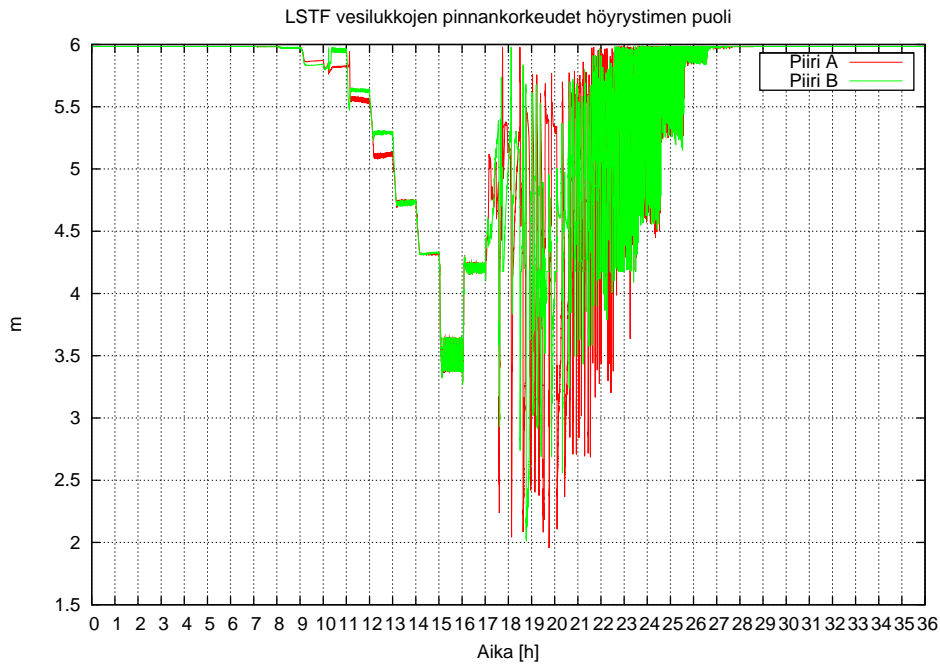
Kuva 12. LSTF-laskennan aikaiset kuumien haarojen massavirrat.



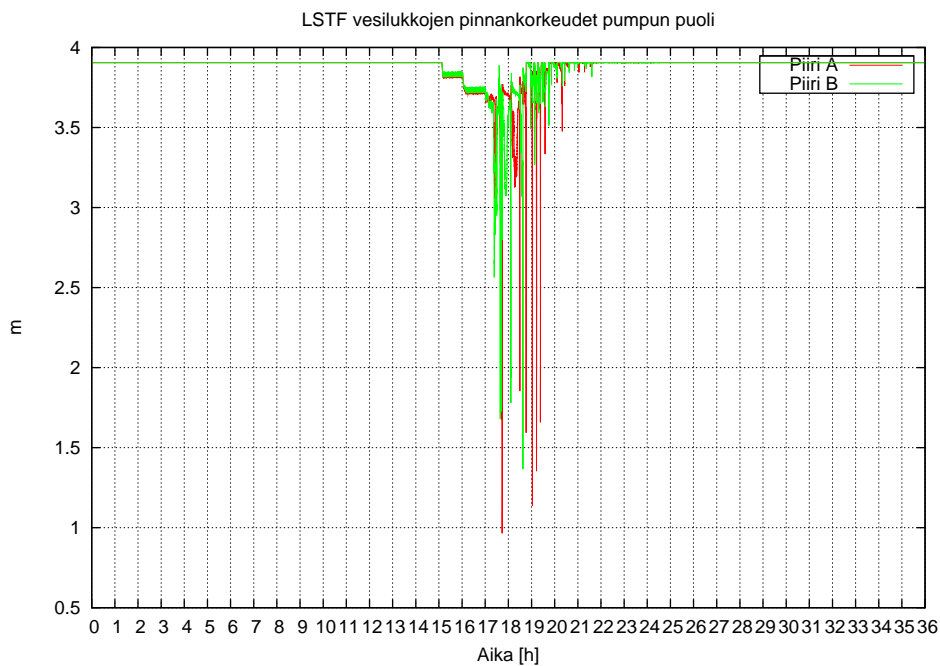
Kuva 13. LSTF-laskennan aikaiset pinnankorkeudet höyrystimien lämmönsiirtoputkissa.

15. Reaktorisydämen lämpötilat alkoivat nousta, kun jäähdytettä oli vähennetty primääripiirin lasketusta kokonaisinventaarista hieman yli kaksi kolmannesta, eli 3800 kilogrammaa. Hieman ennen kuin sydämen lämpötilat nousivat riittämättömän jäähdytyksen takia, erkaantui piirien käytös hetkellisesti toisistaan. Piirissä B massavirta kuumassa haarassa laski alle kilogrammaan sekunnissa ja osa höyrystimessä lauhtuneesta vedestä palasi

takaisin kuumaa haaraa pitkin. Piiriin B muodostui kiehutus-lauhdutusmoodi. Samalla piirissä A massavirta putosi 1,3 kilogrammaan sekunnissa. Veden osuus A-piirin massavirrasta säilyi korkeana. Kiehutus-lauhdutusmoodi käynnistyi myös A-piirissä viimeisen uloslaskun loputtua. Piirien eriaikaisesta käytöksestä johtuen myös boorittoman veden kertyminen vesilukkoihin tapahtui eriaikaisesti.



Kuva 14. LSTF-laskennan aikaiset pinnankorkeudet vesilukoissa höyrystimen puolella.

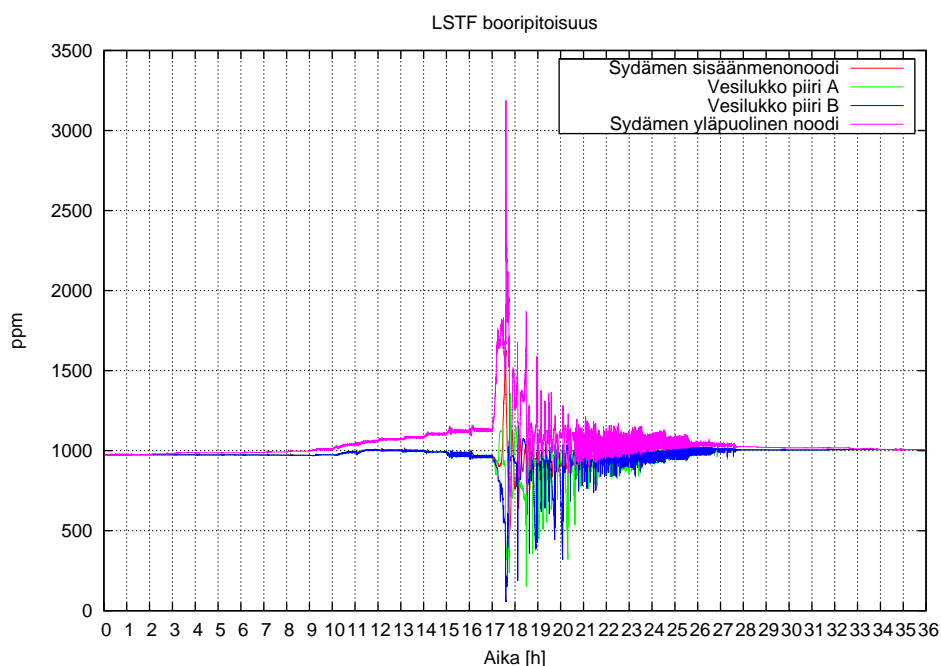


Kuva 15. LSTF-laskennan aikaiset pinnankorkeudet vesilukoissa pumpun puolella.

Boorin laimenemisen alkaessa höyrystimien lämmönsiirtoputkissa oli pääosin höyryä. Vesilukoissa höyrystimen puolella pinnankorkeus oli laskenut puolitoista metriä ja pumpun puolella noin 20 cm. Booripitoisuuksia eri puolilla primääripiiriä laskennan aikana on esitetty kuvassa 16. Kun B-piirin booripitoisuus lähti laskuun, lähti vesilukon booripitoisuus A-piirissä hetkellisesti kasvuun. Molempien vesilukkojen booripitoisuudet lähtivät voimakkaaseen laskuun, kun jäähdytteen määrää alettiin kasvattaa suojakuoren maksimilämpötilan ylitettyä 700 astetta. Vesilukkoihin ei ehtinyt kertyä yhtä suurta boorittoman veden tulppaa kuin muissa laskennoissa. Jäähdytteen lisäämisen jälkeen ja sydämen lämpötilojen palaututtua alkuperäiselle tasolle, lähtivät vesilukkojen booripitoisuudet kasvuun. Sydämen sisäänmenonoodissa booripitoisuus kävi alimmillaan 500 ppm:ssä. A-piirin vesilukon booripitoisuus oli pienimmillään 240 ppm ja B-piirin 60 ppm.

Laskentaa jatkettiin syöttämällä jäähdytettä portaittaisesti tunnin välein. Syöttönopeus primääripiiriin oli noin 0,4 kg/s. Vettä lisättiin uloslaskentaa vastaavalla automatiikalla uloslaskukohtaan reaktorin alapuolelle. Sydämen lämpötila asettui alkuperäiselle tasolle ensimmäisen jäähdytteenlisäyksen ansiosta. Tasaantumisen jälkeen kuumimman sauvan suojakuoren maksimilämpötila vaihteli

voimakkaasti kolme kertaa ja ylitti hetkellisesti 230 °C. Syötettävän jäähdytteen lämpötila asetettiin vastaamaan syöttökohdan lämpötilaa. Lämpötilan valinnalla pyrittiin minimoimaan syötön aiheuttamat häiriöt järjestelmälle. Jäähdytteen lisääminen käynnisti luonnonkierron ensin A-piirissä. Koska höyrystimet olivat erotettuna toisistaan sekundääripuolelta, erkanivat sekundääripiirien paineet toisistaan. B-höyrystimen sekundääripuolen paine jäi aluksi A-höyrystimen sekundääripuolen painetta alemmaksi. Jonkin ajan kuluttua massavirta piirissä A lähti luonnonkierron käynnistymisen jälkeen kuitenkin laskuun ja luonnonkierto loppui 15 minuutin kuluttua käynnistymisestäään. Samalla käynnistyi piirissä B luonnonkierto. B-höyrystimen matalamman sekundääripuolen paineen vuoksi lämmönsiirto höyrystimessä oli heti muutoksen jälkeen tehokasta. Kun primääripiiristä siirtyi lämpöä reaktorin tehontuottoa enemmän sekundääripiiriin, lähti primääripiirin paine laskuun. Primääripaineen säätämiseksi malliin lisätty automatiikka pyrki höyryvirtausta kuristamalla säilyttämään primääripaineen vakiona. Höyryvirtauksen kuristaminen nosti sekundääripuolen painetta erityisesti B-höyrystimessä, jonka kautta suurin osa reaktorin tuottamasta lämmöstä siirtyi sekundääripiiriin. Aina, kun toisessa piirissä massavirrat lähtivät kasvuun, katkesi toisen piirin luonnonkierto. Höy-



Kuva 16. LSTF-laskennan aikaiset booripitoisuudet.

rystimien sekundääripuolen paineet vaihtelivat sen mukaan, kummassa piirissä luonnonkierto oli käynnissä. Värähtelyt pääsivät voimistumaan, koska höyrystimet olivat erotettuna sekundääripuoleltaan. Runsas lämmönsiirto toimivasta höyrystimestä nosti sen sekundääripiirin painetta ja lämpötiloja. Kun toisen höyrystimen sekundääripuolen paineet ja lämpötilat olivat laskeneet ja paine lämpöä siirtävän höyrystimen sekundääripuolella noussut riittävästi, siirtyi luonnonkierto siihen kiertopiiriin, jossa lämmönsiirto matalamman sekundääripuolen paineen vuoksi tapahtui helpommin. Sydämen kuumeneminen sai aikaan häiriön, joka aloitti virtausten vaihtelun eri kiertopiirien välillä.

Erillisellä laskennalla kokeiltiin säilyykö stabiili tilanne täyttövaiheen tasoituttua, jos jäähdytettä aletaan uudelleen vähentää. Lisälaskennalla saatujen tulosten voitiin todeta vastaavan aiemmin laskettua jäähdytteen määrän vähentämistä, eli virtaukset primääripiirissä käyttäytyivät varsin stabiilisti. Primääripiirien vuorottelun käynnistyminen vaati riittävän häiriön ja luonnonkierron eriaikaisen käynnistymisen. Primääripiirin paineensäätöautomaattien ja piirien erottamisen yhteisvaikutus saattoi aiheuttaa massavirtojen voimakkaan vaihtelun kiertopiirien välillä. Ilmiö saattoi johtua myös laskennallisista syistä, jolloin sitä ei saataisi toistetuksi todellisissa kiertopiireissä. Massavirtojen vaihtelut pääsevät mahdollisesti voimistumaan myös primääripiirin paineen säätöön käytetyn automaattien liian ripeän toiminnan takia. Rauhallisemmalla säädöllä tilanne saattaisi tasoittua ajan kuluessa. Piirien virtausten vuorottelu loppui vasta, kun jäähdytettä oli lisätty 2200 kg ja vesilukot olivat täyttyneet vedellä. Täyttövaiheen alun kestänyt piirien virtausten vuorottelu aiheutti voimakkaita vaihteluita useisiin primääripiiriin suoreisiin. Vaihtelu kiertopiirien välillä näkyi muun muassa primääripiirin paineen epätasaisuutena ja kiertopiirien voimakkaasti oskilloivissa massavirroissa.

Täyttövaiheessa pysyvämpi maksimimassavirta saavutettiin kiertopiireissä, kun jäähdytettä oli lisätty 2600 kg. Laskennan lopuksi primääripiirin paine lähti kasvuun, kun primääripiirissä ei enää

ollut höyryä tasaamassa muutoksia. Primääripiirin paine kasvoi jäähdytteen lisäämisessä käytettävän pisteen paineen tasolle. Lisää LSTF-laskennan tuloksia on esitetty liitteen 2 kuvissa.

5.5 Laskenta EPR-mallilla

Kokeen laskentaa varten mallista piti karsia pois useita osia. Esimerkiksi automaattien mallintavia komponentteja otettiin laajasti pois laskennasta. Pääkiertopumppujen moottorit pysäytettiin, jolloin pääkiertopumput pääsivät pyörimään virtauksen mukana. Lukuisten turvallisuusjärjestelmien toiminta estettiin, sillä ne olisivat estäneet alkutilan saavuttamisen ja laskennan suorittamisen laitoksen normaalikäytöstä merkittävästi poikkeavassa tilassa.

EPR-malli poikkeaa koelaitteistojen malleista laajuutensa lisäksi myös reaktorin kuvauksen osalta. EPR-mallissa reaktorisydämen fysiikka on kuvattu eri tavalla kuin koelaitteistojen malleissa ja terminen teho määräytyy erillisen laskennan kautta. Reaktorisydämen toimintaa kuvaava malli ottaa huomioon fissiotehon laskennassa muun muassa jäähdytteen booripitoisuuden ja lämpötilan aiheuttamat reaktiivisuustakaisinkytkennät. Reaktorikomponentin toimintaa piti muuttaa, sillä laskennan aikana reaktorin haluttiin toimivan vakioteholla. Vakioteholla ajo ei olisi laskennassa onnistunut, jos jäähdytteen ominaisuudet vaikuttaisivat voimakkaasti reaktorin fissiotehoon. Tämän vuoksi reaktori ajettiin pikasulkuun ja määriteltiin jälkilämpötehoksi vakioarvo. Jälkilämpötehon määrittäminen tapahtui Aprosissa parametreja TRDEHE ja TRDETA muokkaamalla. Parametrilla TRDEHE valitaan, mikä jälkilämpökäyrä on laskennassa käytössä. Valitsemalla parametrin arvoksi yksi tuli käyttöön jälkilämpökäyrä, jonka arvot voitiin syöttää käsin. Jälkilämpökäyrä syötettiin parametriin TRDETA käyttämällä setkomentoa. Vaihtoehtoinen tapa mallintaa vakioteho olisi ollut estää pikasulkusignaali ja määritellä reaktorin fissiotehon asetusarvo halutuksi. Tällainen lähestymistapa olisi kuitenkin johtanut herkästi vaihtelevaan tehoon, sillä reaktorin fissiotehoon vaikuttavat termohydraulisten suureiden takaisin-

kytkennät. Laskennan aikana reaktorissa olevan jäähdytteen ominaisuudet vaihtelevat suuresti. Lisäksi säätösauvoilla tapahtuvan tehonsäätö tapahtuu viiveellä. Sydämen tuottama teho olisi voinut vaihdella vaihtoehtoisella tavalla toteutettuna jopa useita megawatteja.

EPR-malli oli aluksi ajettuna normaalia tehoajoa vastaavaan tilaan. Tehoajon aikainen booripitoisuus oli kokeen booripitoisuutta alempi. Ajettaessa mallia alkutilaansa huomattiin havainnollisesti booripitoisuuden merkitys painevesireaktorille. Reaktori ei pysynyt alikriittisenä liian matalan booripitoisuuden takia, joten vakioksi määritellyn jälkilämpötehon lisäksi syntyi fissiotehoa. Lisäämällä alkutilaan ajettaessa booria PKL-kokeen mukaiseen 2000 ppm:ään saatiin reaktorin teho pysymään vakiona. EPR-mallin ajaminen tilaan, joka on varsin epätyypillinen laitokselle, ei muutoin aiheuttanut suurempia ongelmia. Paineen alentaminen 12 bariin ja lämpötilojen saaminen oikealle alueelle vei paljon laskenta-aikaa, sillä lämpörakenteisiin oli varastoituneena huomattava määrä lämpöä.

Turvallisuusjärjestelmien lisäksi EPR-mallissa on kuvattuna normaalit laitoksen käyttöön liittyvät vedenkäsittelyjärjestelmät. Mallista otettiin pois laskennasta kaikki primääripiiriin tulevat syötöt, jotta saatiin ajetuksi PKL-koetta vastaava tapahtumasarja lävitse. Laskettaessa ensimmäisiä kertoja koetta läpi huomattiin, ettei piirien käytös ollut yhdenmukaista. Yhdestä kiertopiiristä huomattiin piste, jonka geometria ei ollut yhdenmukainen muiden piirien vastaavien pisteiden kanssa. Poikkeava käytös yhdessä piirissä vaikutti myös muiden piirien käyttöön. Poikkeavan pisteen geometria korjattiin yhdenmukaiseksi muiden piirien vastaavien pisteiden kanssa poistamalla siihen liittyvä CVCS-järjestelmän (Chemical and Volume Control System) venttiili. Ensimmäisten alustavien laskentakokeiluiden jälkeen siirryttiin myös EPR-mallissa käyttämään höyryvirtauksen kuristuksessa höyrystinkohtaista säätöä. Esimerkkiä otettiin LSTF-mallin käytöstä, jossa yksi säätäjä asetettiin ohjaamaan kaikkien höyrystimien kuristusta. Höyrystimet eivät muutoksen jälkeen

Taulukko 8. EPR-laskennan alkutilan arvoja.

Primääripiirin paine	12,1 bar
Reaktorin teho	82 MW
Sydämen ulostulolämpötila	187 °C
Sekundääripiirin paine	6,9 bar

olleet sekundääripuoleltaan yhteydessä toisiinsa. Höyrystimien erottaminen sekundääripuolelta toisistaan rauhoitti laskennan kulkua ja vähensi virtauksien ja lämmönsiirron vaihtelua eri kiertopiireissä. Taulukossa 8 on esitetty EPR-laskennan alkutilan arvoja.

Höyrystimiin syötettävän veden virtauksen epätasaaisuus aiheutti voimakasta epästabiilia käytöstä piireissä. Tätä yritettiin korjata rajoittamalla höyrystimien pinnankorkeutta säätävien venttiilien toiminta-alueita. Lisäksi nostettiin syöttöveden lämpötilaa alkuperäisestä 25 astetta, jotta syötettävä vesi ei häiritsisi tasaista höyrystimen toimintaa. Tehdyistä muutoksista huolimatta piirin käytöstä ei saatu täysin tasoittumaan. Höyrystimien sekundääripuolen pinnankorkeuden säädössä käytettiin valmista automatiikkaa, joka toimii hyvin normaaleissa tilanteissa. Automatiikkaa yritettiin saada toimimaan vakaasti myös pienillä virtausmäärillä. Käytetty automatiikka ei tehtyjen muutosten jälkeen kuitenkaan kyennyt pienillä virtauksilla aikaansaamaan täysin vakaata syöttövirtausta höyrystimiin, jolloin höyrystimien pinnankorkeus vaihteli pysyen kuitenkin lämmönsiirtoputkien yläpuolella. Höyryvirtauksen kuristukseen perustuva primääripaineen säätö aiheutti epävakautta myös syöttövirtaukseen. Massavirrat vaihtelivat EPR-laskennassa voimakkaammin täyttövaiheen lisäksi myös tyhjennysvaiheessa verrattuna koelaitteistojen malleilla tehtyihin laskuihin. Koelaitteistoja epästabiilimpi käytös saattoi johtua esimerkiksi säätöautomatiikan aiheuttamista häiriöistä tai numeerisen ratkaisun aiheuttamista häiriöistä.

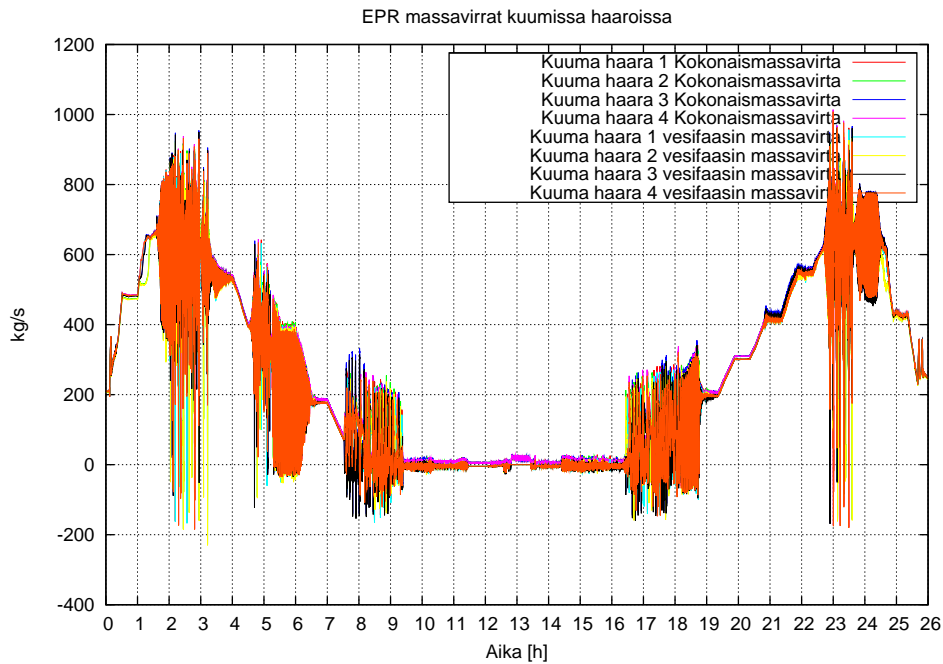
Luonnonkierrolla laskennan alussa ja lopussa vesifaasissa massavirrat piireissä olivat noin 200 kilogrammaa sekunnissa. Höyry kiihdytti jäähdytteen luonnonkiertoa ja synnytti piirien massavir-

toihin epätasaista käyttäytymistä. Suurimmillaan massavirrat piireissä kävivät kaksifaasiluonnonkierrolla yli 800 kg/s. Massavirtojen vaihteluiden jaksonaika tyhjennysvaiheessa oli puolen minuutin suuruusluokkaa. Massavirrat kuumissa haaroissa laskennan aikana on esitetty kuvassa 17.

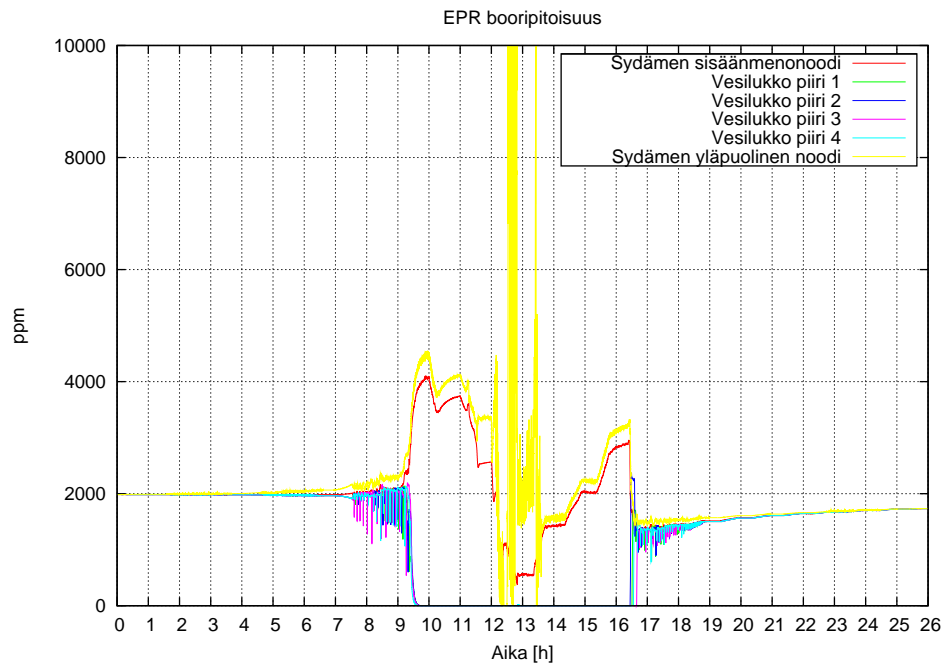
Sekundääripiirin paine nousi jäähdytteen vähentämisen seurauksena automatiikan ohjaamana 10,7 bariin. Booripitoisuudet lähtivät vesilukois-

sa laskuun, kun primääripiiristä oli vähennetty 20 000 kg jäähdytettä. Tämä määrä vastaa 80 prosenttia kaikesta primääripiiristä kokeen aikana poistetusta jäähdytteestä. Booripitoisuuksia eri puolilta primääripiiriä laskennan aikana on esitetty kuvassa 18.

Sydämen lämpötilat ja fissioteho lähtivät kasvuun, kun vähän booria sisältävää vettä pääsi reaktoriin. Sydämessä muodostui matalan boo-



Kuva 17. EPR-laskennan aikaiset massavirrat kuumissa haaroissa.



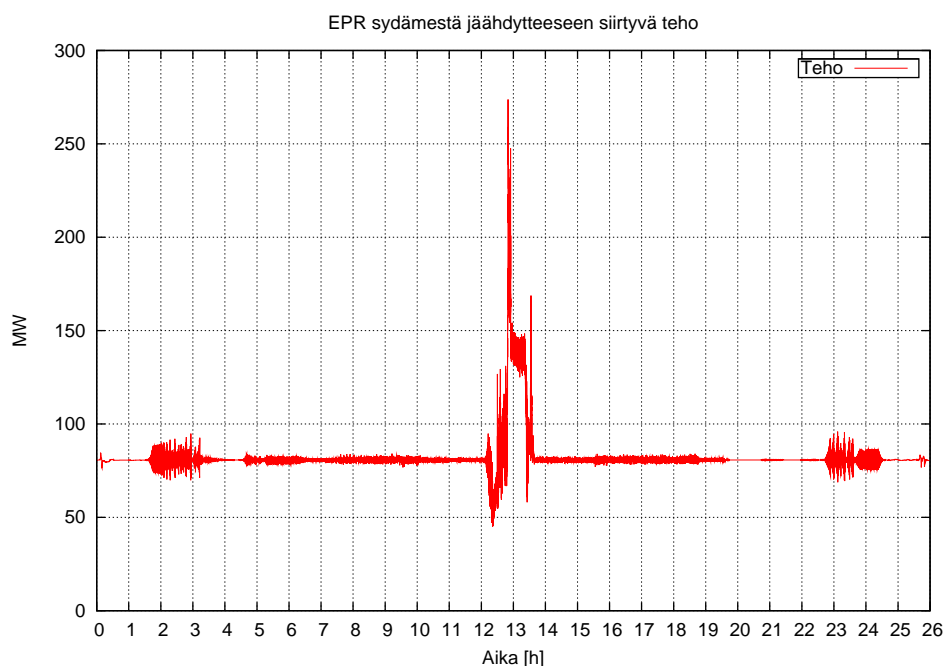
Kuva 18. EPR-laskennan aikaisia booripitoisuuksia eri puolilta primääripiiriä.

ripitoisuuden takia fissiotehoa yhtä paljon, kuin jälkilämmöksi oli määritelty. Ensimmäinen lämpötilapiikki nosti suojakuoren suurimman lämpötilan 195 asteesta 290 asteeseen. Sydäimestä jäähdytteeseen siirtyvä teho laskennan aikana on esitetty kuvassa 19. Jäähdytteen lisäämisen aloittamisen jälkeen lämpötila palautui suurimmasta arvostaan, kunnes lämpötilat lähtivät booripitoisuuden alennuttua riittävästi uudelleen kasvuun. Vähän booria sisältävää vettä kulkeutui reaktoriin vesilukoista. Sydämen sisäänmenonoodin booripitoisuus kävi alimmillaan 382 ppm:ssä. Suurimmillaan suojakuoren maksimilämpötilat kävivät heikentyneen jäähdytyksen ja kohonneen tehon takia yli 900 asteessa. Tässä lämpötilassa suojakuoren zirkoniumin hapettuminen on jo alkanut. Tällaiseen suojakuoren lämpötilaan pääsemiseksi olivat kaikki turvallisuusjärjestelmät ja suuri osa laitoksen normaaleista järjestelmistä otettu pois laskennasta. Tilanne ei kuvaa suoraan laitoksen käyttäytymistä onnettomuustilanteessa. Suojakuorten lämpötilat pysyivät jäähdytteen syötön alkamisen jälkeen alle 900 asteen. Lämpötilat palautuivat lopulta alku- peräiselle tasolle, kun sydämeen tulevan veden booripitoisuus lähti kasvuun ja jäähdytteen määrä oli palautunut riittäväksi jäähdyttämään sydäntä.

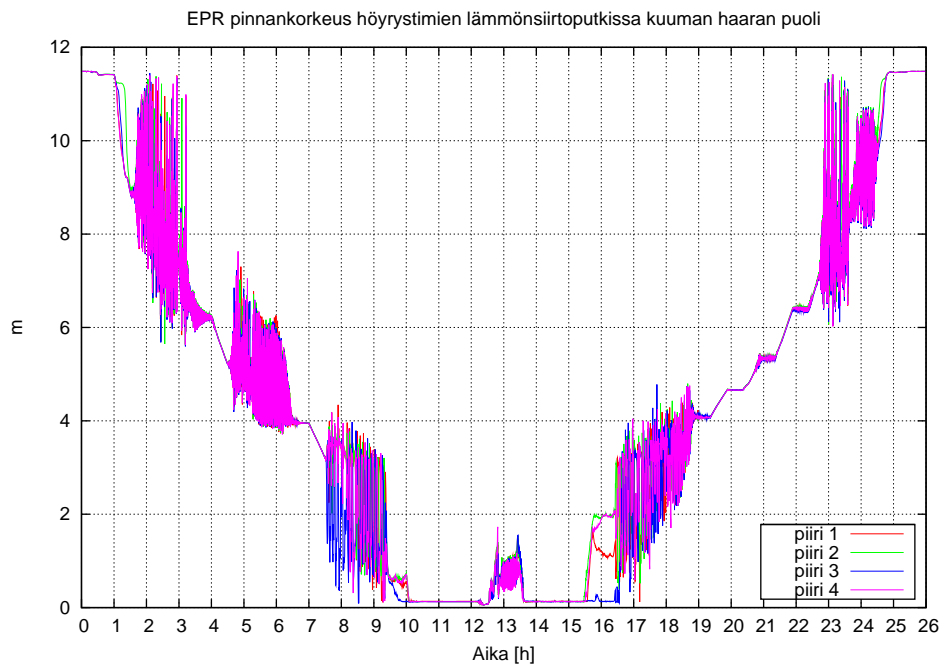
Jäähdytteen lisääminen alkoi kasvattaa massavirtoja kiertopiireissä. Massavirroissa esiintyi voimakasta vaihtelua sekä tyhjennys- että täyt-

tövaiheessa. Höyrystimien lämmönsiirtoputkien pinnankorkeuksia on esitetty kuvissa 20 ja 21. Jäähdytteen määrän muuttaminen sai aikaan häiriöitä primääripiirin paineessa. Painetta säättävä automatiikka reagoi muutoksiin höyryvirtausta kuristamalla. Automatiikka ei saanut pidettyä painetta täysin tasaisena, jolloin höyrystimen lämmönsiirtoputkissa oleva vähäinen määrä höyryä lauhtui välillä kokonaan vedeksi. Kun lauhtuminen loppui, pieneni lämmönsiirto sekundääripiiriin. Lämmönsiirto ei ollut tasaista ja se aiheutti lisää häiriöitä primääripiirin paineeseen. Primääripiirin painetta säättävän automatiikan lisäksi höyrystimien pinnankorkeuden mukaan säätyvä veden syöttö höyrystimien sekundääripuolelle aiheutti epätaisaista käyttäytymistä suurimmilla massavirroilla.

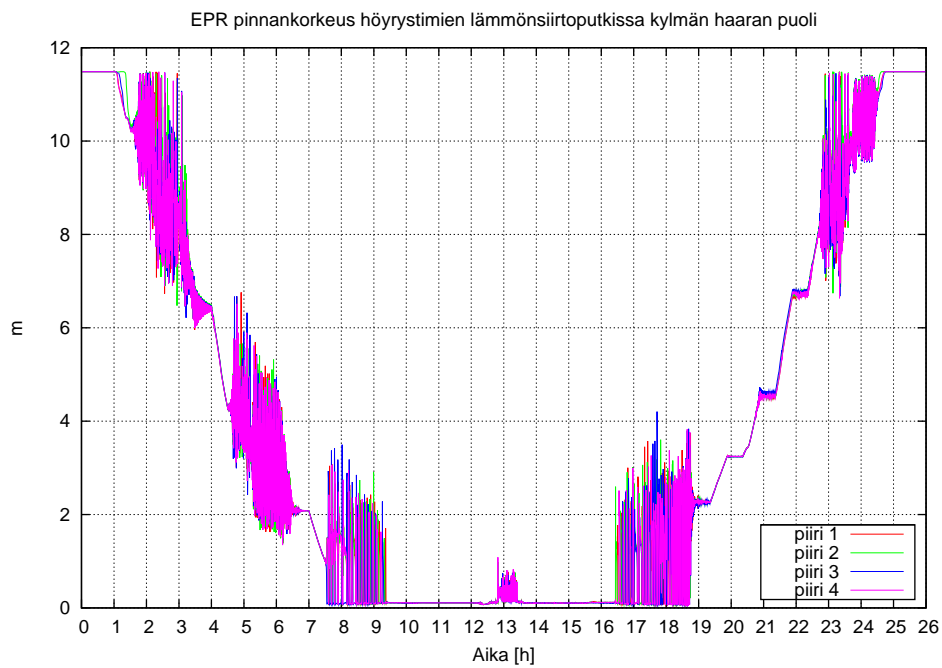
Jäähdytteen lisäämisen seurauksena höyrystimien määrä primääripiirissä väheni. Lopulta primääripiirissä oleva jäähdyte oli kokonaan vesifaasissa. Mallissa oleva komponentti laski noodeihin menevän ja ulostulevan jäähdytteen määrän erotusta. Komponentin mukaan laskennan aikana oli pyörityksien ja epätarkkuuksien vuoksi primääripiiristä kadonnut 45000 kg jäähdytettä. Laskennan aikaisen jäähdytekadon vaikutus nähdään siitä, että jäähdytettä piti lisätä uloslaskua enemmän alkutilaa vastaavaan tilaan uudelleen pääsemiseksi. EPR-laskennan tuloksia on esitetty lisää liitteessä 3.



Kuva 19. EPR-laskennan aikainen sydäimestä jäähdytteeseen siirtyvä teho.



Kuva 20. EPR-laskennan aikaiset höyrystimien lämmönsiirtoputkien pinnankorkeudet kuumien haarojen puolella.



Kuva 21. EPR-laskennan aikaiset höyrystimien lämmönsiirtoputkien pinnankorkeudet kylmien haarojen puolella.

6 Tulosten skaalaus ja vertailu

Koelaitteistomallien antamien tulosten vertaileminen EPR-laskennan tuloksiin suoraan on hankalaa, sillä koelaitteistot ovat tilavuudeltaan pieniä täysikokoiseen voimalaitokseen verrattuna. Tarkkoja skaalauslaskuja tulosten tarkastelemiseksi ei voitu suorittaa, sillä rakennepiirustuksia ei ollut käytettävissä esimerkiksi tilavuuksien suhteiden tutkimiseksi. Vertailu tapahtui Aprosilla laskettujen tulosten perusteella. Vertailussa on huomattava, etteivät koelaitteistot perustu EPR-laitostyyppiin. Aprosilla lasketut tulokset saatiin vertailukelpoisiksi skaalaamalla. EPR-mallissa höyrystimien lämmönsiirtoputket olivat kuvattuna samanmittaisella putkinipulla, jolloin eripituisten höyrystimen lämmönsiirtoputkien vaikutusta luonnonkiertoon ei mallinnettu. Havainnollisia kuvaajia tuloksista saatiin, kun ajan sijaan abskissalle valittiin primääripiirin jäähdytteen määrää kuvaava dimensiota suure. Skaalattu jäähdytteen määrä saadaan yhtälöllä

$$m_D(t) = \frac{\Delta m_{max} - m_{ulos}(t) + m_{sis}(t)}{\Delta m_{max}}, \quad (20)$$

jossa vakio Δm_{max} on laskennan aikana primääripiiristä poistetun jäähdytteen kokonaismäärä, $m_{ulos}(t)$ primääripiiristä poistetun jäähdytteen määrä hetkellä t ja $m_{sis}(t)$ primääripiiriin lisätty jäähdyte hetkellä t . Yhtälön 20 perusteella alkutilassa ja laskennan lopuksi dimensiota jäähdytteen määrä saa arvon yksi. Jäähdytteen määrän ollessa pienimmillään m_D saa arvon nolla. Kaikissa lasketuissa tapauksissa kaksifaasiluonnonkierrolla massavirta kiertopiireissä kasvaa noin nelinkertaiseksi yksifaasiluonnonkierron massavirtaan verrattuna. Massavirtojen suuren mittakaavaeron vuoksi massavirrat suhteutettiin kunkin laskennan aikaiseen suurimpaan arvoonsa. Kuvassa 22 on esitettyinä skaalatut massavirrat molempien koelaitteistojen sekä EPR-laskennan aikana yhtälön 20 mukaisen dimensiottoman jäähdytteen määrän funktiona.

Massavirroissa on havaittavissa kaikissa tapauksissa varsin samantapaista käyttäytymistä. Maksimimassavirta saavutettiin kaikissa tutkimissa tapauksissa silloin, kun höyry kiihdyttää jäähdyteveden virtausta kuumissa haaroissa. Suurin ero tyhjennys- ja täyttövaiheiden välillä oli PKL-laskennassa.

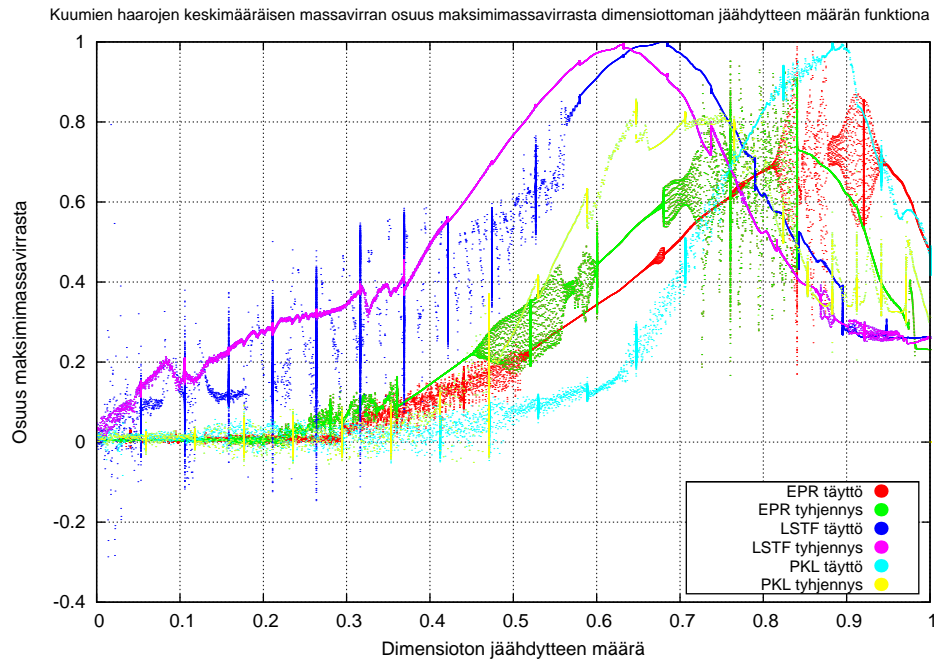
Osuus alkutilan booripitoisuudesta laskennan aikana vesilukoissa skaalatulla jäähdytteen määrällä on esitetty kuvassa 23. LSTF-mallissa booripitoisuudet jäivät epähuomiossa alkutilaan ajettaessa arvoon 1000 ppm. Booripitoisuuksien romahtaminen tietyllä inventaarilla tapahtuu, kun sydämessä höyrystyvä jäähdyte lauhtuu höyrystimissä boorittomaksi vedeksi. Lauhtunut vesi kulkeutuu vesilukkoihin. LSTF-mallissa vesilukoissa oleva jäähdyte ei ehtinyt laimentua boorittomaksi ennen sydämen lämpötilojen nousua ja jäähdytteen lisäämistä. EPR-mallin tulokset asettuvat koelaitteistojen tulosten välille. PKL-mallin tuloksissa on booripitoisuuden laimeneminen varsin samantapaista kuin EPR-mallin tuloksissa.

Eroavaisuuksia täyttövaiheen tuloksiin saattoi aiheuttaa sekundääripuolten erottaminen EPR- ja LSTF-malleissa. PKL-mallissa höyrylinjan kuristus tapahtui yhteisestä linjasta, muilla kuristus mallinnettiin höyrystinkohtaisilla venttiileillä. Piirien käytös oli vakainta PKL-koelaitteiston tuloksissa.

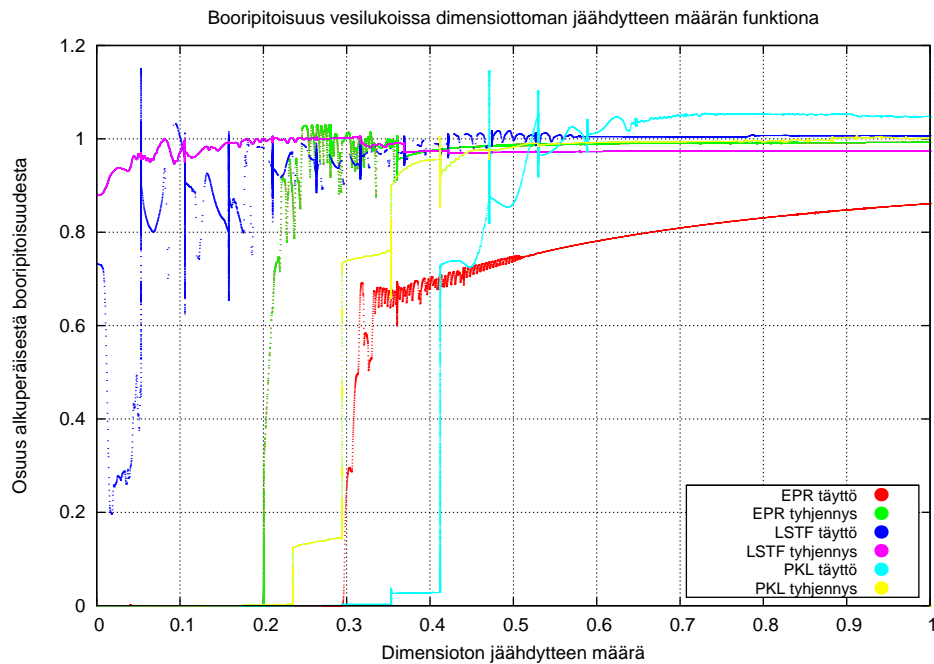
Kokeen laskemiseksi malleihin lisätyllä automatiikalla oli vaikutusta piirien stabiilisuuteen ja yhdenaikaiseen käyttäytymiseen. EPR- ja LSTF-malleissa esiintyneiden piirien välisten epästabiilisuuksien syitä tutkittiin ajamalla LSTF-mallilla täyttymisvaihe pienemmällä reaktorin teholla. Tarkoituksena oli selvittää miten paljon reaktorin teho vaikuttaa epästabiiliin käytökseen. Lisäksi pyrittiin arvioimaan teho-tilavuusskaalauksen käyttökelpoisuutta tutkittuun tapaukseen. Merkittävää eroa ei aikaisempiin laskentatuloksiin syntynyt pienemmällä tehotasolla laskettaessa.

Koska laskuissa tarkasteltiin portaittaista muutosta jäähdyteinventaarissa, ei koelaitteistojen mahdollisesti ripeämpi käytös näy tuloksissa. Ko-

keen aikana suuri joukko keskeisiä suureita pidettiin vakiona, jolloin niiden muutosten vaikutusta ei laskettujen tulosten perusteella voida arvioida.



Kuva 22. Kuumien haarojen keskimääräisen massavirtojen osuus maksimimassavirrasta dimensiottoman jäähdytteen määrän funktiona.



Kuva 23. Osuus alkutilan booripitoisuudesta vesilukoissa dimensiottoman jäähdytteen määrän funktiona.

7 Skaalatuista koelaitteistoista turvallisuusanalyysiin

Työssä on esitetty ne loogiset askeleet, jotka tarvitaan pääsemään koelaitteistojen suunnittelusta turvallisuusanalyysiin ja niiden käyttämiseen ydinvoimalaitosten turvallisuuden arvioimisessa. Näiden askeleiden ottamisessa tulee noudattaa riittävää huolellisuutta ja varovaisuutta.

Integraalikoelaitteiston tulosten arvioinnissa ja tulosten käyttämisessä todellisten laitosten käyttäytymisen ennustamiseen tulee noudattaa varovaisuutta. Tulosten tulkinnassa on huomioitava erimittakaavan aiheuttamat muutokset ilmiöihin. Jo koelaitteiston suunnitteluvaiheessa tehtävässä skaalauksessa tulee väistämättä vääristymiä alkuperäisestä laitoksen geometriasta ja käyttäytymisestä. Käyttämällä täysikokoisten erilliskoelaitteistojen tuloksia yhdessä integraalikoelaitteistojen tulosten kanssa voidaan saada hyvä kuva ilmiöiden esiintymisestä myös suuremmissa mittakaavassa. Erilliskoelaitteistoilla saadaan tutkittua ilmiöitä ja ilmiöiden välisiä vuorovaikutuksia oikeassa mittakaavassa. Tämän tutkimuksen pohjalta voidaan kelpoistaa laskentaohjelmia kattamaan täysikokoiset kiertopiirit. Kokeiden kattama alue on kuitenkin aina rajallinen. Tämä tulee huomioida koetuloksia käytettäessä. Validoiduilla laskentaohjelmilla tehtyjen tarkastelujen perusteella on mahdollista tehdä päätelmiä esimerkiksi turvallisuusjärjestelmien riittävydestä onnettomuustilanteissa. Laskentaohjelmien kelpoistamisen lisäksi integraalikoelaitteistojen avulla tehtävä tutkimus auttaa löytämään ja ymmärtämään erilaisia ilmiöitä sekä niiden välisiä vuorovaikutuksia. Heikommin tunnetuilla ilmiöillä voi olla hyvinkin monimutkaisia skaalausriippuvuuksia, joita ei vielä välttämättä tunneta riittävästi.

Koelaitteiston suunnittelussa ja käytössä laadittavaa PIRTiä voidaan käyttää alkuperäisen käyttötarkoituksensa lisäksi kohdentamaan tutkimusta tärkeisiin ilmiöihin. PIRTiä tulisi kehittää edelleen monipuolisena työkaluna, eikä pitää sitä vain pakollisena osana skaalausta. Skaalattujen koelaitteistojen perimmäinen ongelma on virtausreittien koon suuri vaikutus järjestel-

män toimintaan. Joidenkin ilmiöiden kohdalla luotettavia tuloksia saadaan vain täysimittaisilla koelaitteistoilla. Erilliskoelaitteistot ovat tärkeitä integraalikoelaitteistoilla tehtävän tutkimuksen täydentäjinä, sillä täysikokoiset integraalikoelaitteistot olisivat liian kalliita. Kokeiden tulosten pohjalta tehtyjen korrelaatioiden pätevyysalue on määriteltävä tarkoin. Laskentaohjelmien kelpoistamisessa ja tulosten muussa hyödyntämisessä tulisi pysytellä tutkitulla alueella, sillä ilmiöillä voi olla voimakkaita epäjatkuvuuskohtia heti tarkastelualueen ulkopuolella. Laskentaohjelman olisi hyvä varoittaa käyttämiensä korrelaatioiden pätevyysalueen ylittymisestä. Pätevyysalueen ulkopuolella käytettäessä korrelaatiot johtavat usein virheellisiin tuloksiin. Käyttäjälle olisi avuksi, jos ohjelma kykenisi itse arvioimaan tulosten mahdollista järjenvastaisuutta. Laskentaohjelman antaman varoituksen jälkeen saatuihin tuloksiin voisi suhtautua riittävällä varauksella.

Jos laskentaohjelma on kelpoistettu vain pienen mittakaavan integraalikoelaitteistojen tuloksilla, voidaan olettaa laskentaohjelman kykenevän laskemaan koelaitteistomittakaavassa, muttei välttämättä laitosmittakaavassa. Koelaitteiston suunnittelussa voidaan käyttää laskentaohjelmia, mutta niiden kykyyn skaalata ei pitäisi luottaa. Jos laskentaohjelmaa käytetään koelaitteiston suunnittelussa skaalauksen apuna tärkeimpänä työkaluna ja koelaitteiston tuloksia käytetään kelpoistamaan kyseistä laskentaohjelmaa, on vaarana kehän kiertäminen ja virheelliset päätelmät. Johtopäätöksiä voidaan laitosmittakaavassa vasta, kun saadaan perustutkimuksella riittävän hyvä käsitys ilmiöistä ja niihin vaikuttavista tekijöistä. Skaalattujen koelaitteistojen tärkein anti kelpoistamistyökaluna olemisen lisäksi on parempi ymmärrys ilmiöistä ja niiden välisistä vuorovaikutuksista.

Diplomityössä tarkasteltujen koelaitteistojen tuloksista on vaikeaa tehdä tarkkoja päätelmiä EPR:n käytöksestä. Kokeen pääpiirteet olivat kuitenkin samat kaikissa tapauksissa. Koelaitteistoilla saa-

daan tarkkaa mittaustietoa ilmiöistä, mutta mit-takaava voi vaikuttaa ilmiöön ja sen esiintymiseen. Tarkkaa ilmiön esiintymishetkeä ja voimakkuutta voimalaitosmittakaavassa on hankala määrittää pelkästään koelaitteistojen tulosten perusteella. Tässä työssä käytettyjen koelaitteistojen suunnit-telu perustuu eri mallilaitosyksiköiden käyttöön skaalauksessa. Tästä seuraa suoraan vääristymiä niin korkeussuhteissa kuin piirin eri osien tila-vuussuhteissakin. Tilavuussuhteilla on vaikutusta jäähdytteen jakaantumiseen eri puolille primää-ripiiriä. Jäähdytteen jakautuminen vaikuttaa sii-hen millä jäähdyteinventaarilla ilmiöt esiintyvät. Tuloksissa on oletettavissa laitoksille ominaisten piirteiden aiheuttamia eroja. LSTF-koelaitteiston vahvuutena voidaan nähdä muita koelaitteistoja avarimmat virtauskanavat, joissa virtaus pääsee kerrostumaan paremmin. LSTF:n kaksi kiertopiiriä eivät mallinna kuitenkaan täysin EPR:n neljää. PKL-koelaitteistossa pienehköt virtauskanavat vaikuttavat tuloksiin, vaikka piirien määrä onkin oikea. Koelaitteistoilla saadaan laadukasta dataa ilmiöiden tutkimista ja laskentaohjelmien kelpois-tamista varten. Riittävän erilaisilla koelaitteistoilla tehdyistä samantapaisista kokeista saadaan arvo-kasta tietoa eri parametrien vaikutuksista. Lasken-taohjelmien kykyä päästään samalla testaamaan laajalla alueella ja tämä osaltaan vahvistaa uskoa laskentaohjelmien kykyyn tuottaa oikeansuun-taisia tuloksia. Erilliskoelaitteistoilla tehtävillä kokeilla saadaan oikeassa geometriassa tarkkaa vertailudataa laskentaohjelmien kelpoistamiseen. Monien ilmiöiden, kuten kaksifaasikitkan, epäli-nearisuus vaatii tarkasteluja riittävän suuressa mittakaavassa.

Mielenkiintoisia tarkasteluja laskentaohjelmien kyvyistä saadaan laitoksilla mitatuista tahattomis-ta häiriöistä, joita voidaan myöhemmin mallintaa ja tarkastella laskentaohjelmilla. Laitoshäiriöiden aikana mitattu data on kuitenkin summittaisempaa kuin koelaitteistojen tuottama data, sillä ydinvoi-malaitoksissa tallentavaa mittausinstrumentointia on huomattavasti koelaitteistoja vähemmän.

Koelaitteistot perustuvat aina johonkin voima-laitostyyppiin ja tiettyyn voimalaitosyksikköön. Jokaisella laitosyksiköllä on omat erityispiirteensä, jotka vaikuttavat niiden käyttäytymiseen häiriö- ja onnettomuustilanteissa. Integraalikoelaitteis-to on kuitenkin mahdollista rakentaa helposti muokattavaksi, jolloin voidaan tutkia erilaisten

laitosyksiköiden toimintaa samalla perusrungolla. Saman perusrungon käyttämisellä voidaan säästää koelaitteiston rakentamiskustannuksissa.

Ydinvoimalaitoksen suunnittelussa, rakenta-misessa ja käytössä tulee huomioida inhimilliset virheet. Turvallisuustutkimuskaan ei voi välttyä inhimillisiltä virheiltä. Inhimillisten virheiden pois-taminen täysin on mahdotonta ja siksi laskennan puolueeton verifointi on tärkeää tehtäessä turvalli-suuden kannalta tärkeitä päätöksiä. Eri laskentaoh-jelmilla tehdyillä laskuilla pyritään varmistumaan siitä, ettei yksittäisen laskentaohjelman virhe johda vääriin johtopäätöksiin. Kun eri ohjelmia käyttävät eri ihmiset tai eri organisaatiot, saadaan yksit-täisen henkilön tekemät johdonmukaiset virheet karsittua. Virhemahdollisuuksia laskentaohjelmien käytössä on lukuisia, eikä useiden laskentaohjel-mien käyttö eri organisaatioiden toimestakaan takaa täysin luotettavaa tulosta. Käyttäjäefektin minimoimisessa suurin vaikutus on käyttäjän huolellisuudella. Turvallisuuden kannalta tulee tehdä riittävä määrä herkkyytstarkasteluja lasken-taan liittyvien epävarmuuksien kartoittamiseksi. Kaikkien parametrien läpikäynti jokaista laskua varten erikseen veisi liikaa aikaa, eikä välttämättä onnistuisi paljastamaan virheitä. Diplomityötä tehdessä laskennan aikana havaitut epäloogisuudet paljastivat virheellisiä syötteitä niin mallissa kuin itse tehdyissä ajotiedostoissakin. Myös malliin laskentaa varten tehdyissä muutoksissa havaittiin virheitä ja puutteellisuuksia. Virheiden määrän karsimiseksi on tärkeää, että syötettävät suuret tarkastetaan syöttämisen jälkeen huolellisesti. Laskennan tuloksissa esiintyviä virheiden ai-kaansaamia epäloogisuuksia tarkastellessa kuluu huomattavasti aikaa. Kun malli saadaan käyt-töön toisen kokeen alkutilassa, voi malliin jäädä huomaamatta edellisessä laskennassa tärkeitä, mutta sillä hetkellä tarkasteltavassa tapauksessa haitallisia valintoja. Tärkeimpien laskentaa mää-rittävien valintojen oikeellisuuden tarkastamista helpottaisi valmis lista, johon ohjelman asetuksia voisi verrata. Riittävän laadukas dokumentaatio laskentaohjelmasta ja -mallista on korvaamaton apu laskentaohjelman käytössä. Usein on mah-dollista mallintaa sama asia useilla eri tavoilla, jolloin voidaan tutkia mallintamisen vaikutusta tuloksiin. Mallin käytössä tehtävät valinnat tulisi dokumentoida ja perustella myöhemmin tehtävien tarkastelujen tueksi.

8 Yhteenveto

Työssä tarkasteltiin kirjallisuuden pohjalta koelaitteistojen skaalauksessa käytettäviä periaatteita ja menettelyjä. Lisäksi laskettiin mukaillen kolmella Aprosin mallilla PKL-koelaitteistolla suoritettu koe. PKL-mallilla lasketut tulokset vastasivat melko hyvin PKL-koelaitteistolla suoritettua F1.2-kokeen tuloksia. Kolmen mallin tuloksissa huomattiin varsin samantapaista käyttäytymistä. Turvallisuusanalyysiinkin käytettävän Aprosin kyvyistä laskea eri mittakaavoissa saatiin lisää varmuutta. Jatkossa olisi hyödyllistä tehdä eri mittakaavaisilla koelaitteistoilla samoilla reunaehdoilla

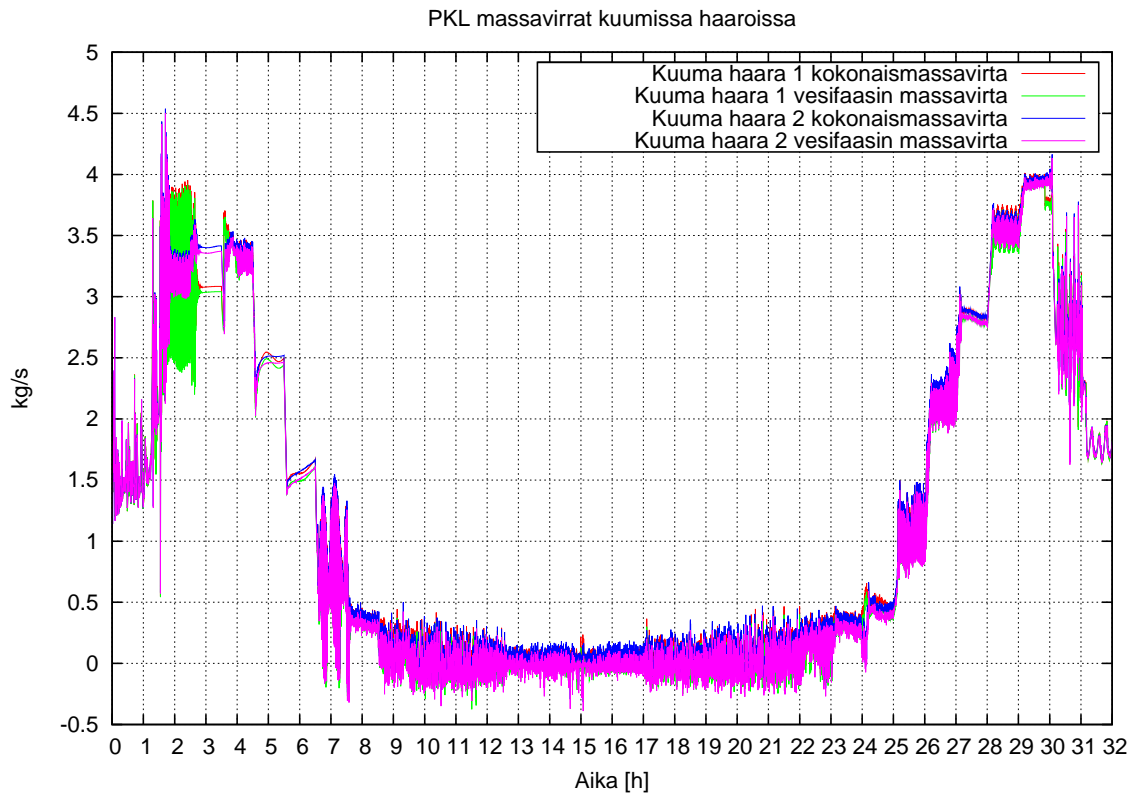
vertailukokeita, jolloin saataisiin paremmin vertailtua koelaitteistojen mittakaavaeroista johtuvia vaikutuksia ilmiöiden esiintymiseen. Esimerkiksi LSTF-koelaitteistolla tehtävä, PKL-koetta F1.2 mukaileva koe antaisi mahdollisuuden mittakaavan vaikutusten tarkasteluun. Samoilla reunaehdoilla tehtävien kokeiden tulosten vertailu laskentaohjelmilla tehtäviin tarkasteluihin antaisi lisäksi varmuutta laskentaohjelmien kykyyn laskea oikein. Mielenkiintoista tutkimusta päästään jatkamaan muun muassa PACTEL-koelaitteistoon tehtyjen muutosten jälkeen.

Lähdeluettelo

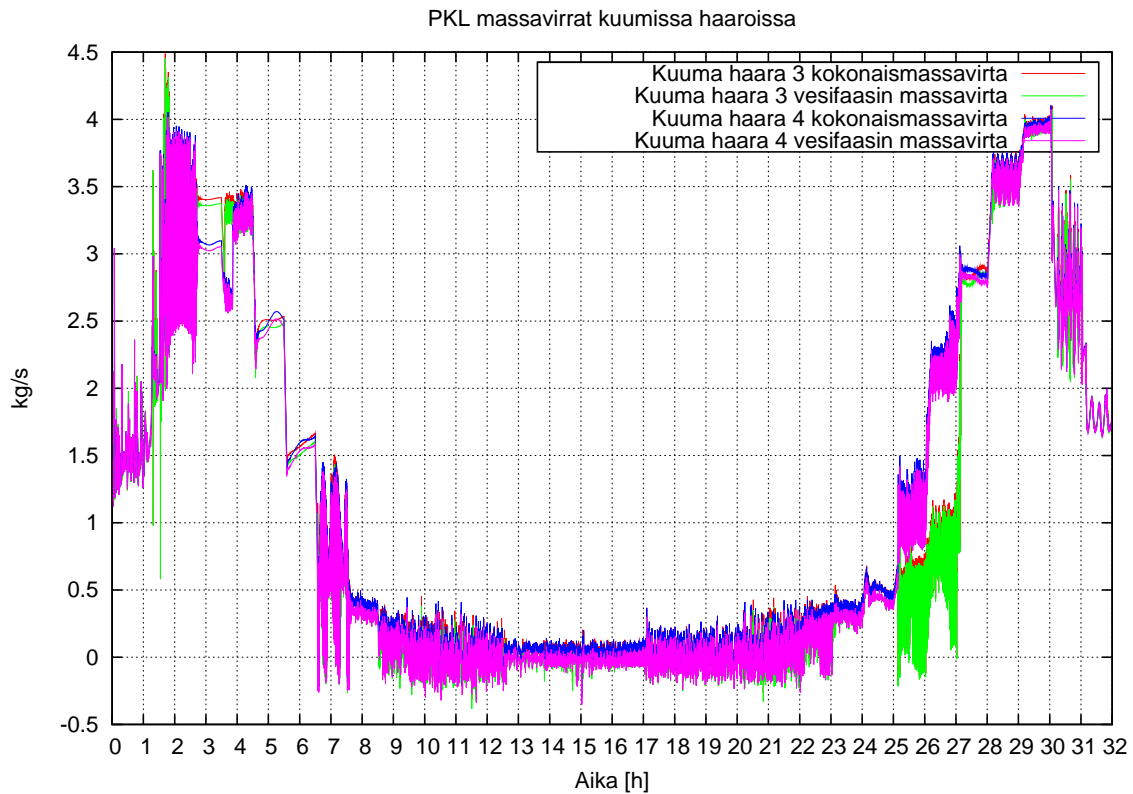
- [1] Purhonen, H. 2007. Experimental thermal hydraulic studies on the enhancement of safety of LWRs Lappeenranta, 73 p. Acta Universitatis Lappeenrantaensis 293.
- [2] Purhonen, H., Puustinen, M., Riikonen, V., Kyri-Rajamäki, R., Vihavainen, J. 2006. PACTEL integral test facility – Description of versatile applications Annals of Nuclear Energy 33, pp. 997–1009.
- [3] Ransom, V.H., Wang, W., Ishii, M. 1998. Use of an ideal scaled model for scaling evaluation. Nuclear Engineering and Design 186, pp. 135–148.
- [4] Ishii, M., Revankar, S. T., Downar, T., Xu, Y., Yoon, H.J., Tinkler, D. Rohatgi, U.S. 2003. Modular and Full Size Simplified Boiling Water Reactor Design with Fully Passive Safety Systems.
- [5] Levin, E., McPherson, G. 1995. A practical view of the insights from scaling thermal-hydraulic tests. Proceedings, NURETH 7 International Meeting on Nuclear Reactor Thermal-hydraulics, pp. 1291–1301.
- [6] Kocamustafaogullari, G., Ishii, M. 1987. Scaling of two-phase flow transients using reduced pressure system and simulant fluid. Nuclear Engineering and Design, pp. 21–132.
- [7] Buckingham, E. 1914. On physically similar systems; Illustrations of the use of dimensional equations. Physical Review, 4(4), pp. 345–376.
- [8] Ryti, H. Tekniikan käsikirja 7. 1975. Jyväskylä, K.J. Gummerus osakeyhtiö, kahdeksas uusittu ja lisätty painos. 688 s.
- [9] Madrid, C.N., Alhama, F. 2006. Discrimination: A fundamental and necessary extension of classical dimensional analysis theory. International Communication in Heat and Mass Transfer 33, pp. 287–294.
- [10] Madrid, C.N., Alhama, F. 2005. Discriminated dimensional analysis of the energy equation: Application to laminar forced convection along a flat plate. International Journal of Thermal Sciences 44, pp. 333–341.
- [11] Ishii, M., No, H. C., Zhang, G., Eltawila, F. 1994. Stepwise Integral Scaling Method and Its Application to Severe Accident Phenomena, Nuclear Engineering and Design 151, pp. 223–234.
- [12] Ishii, M., Kataoka, I. 1984. Scaling laws for thermal-hydraulic system under single phase and two-phase natural circulation, Nuclear Engineering and Design 82, pp. 411–425.
- [13] Novak, Z. 2001. The effects of complexity, of simplicity and of scaling in thermal-hydraulics, Nuclear Engineering and Design 204, pp. 1–27.
- [14] Zuber, N. et al. 1998. An integrated structure and scaling methodology for severe accident technical issue resolution: Development of methodology Nuclear Engineering and Design 186, pp. 1–21.

- [15] Zuber, N., Wulff, W., Rohatgi, U.S., Catton, I. 2005. Application of Fractional Scaling Analysis (FSA) to Loss of Coolant Accidents (LOCA). Part 1. Methodology Development. Proceedings of the 11th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics (NURETH-11) Popes' Palace Conference Center, Avignon, France, October 2–6, 2005.
- [16] Wulff, W., Zuber, N., Rohatgi, U.S., Catton, I. 2005. Application of Fractional Scaling Analysis to Loss of Coolant Accidents (LOCA). Part 2. System Level Scaling for System Depressurization. Proceedings of the 11th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics (NURETH-11) Popes' Palace Conference Center, Avignon, France, October 2–6, 2005.
- [17] Catton, I., Wulff, W., Zuber, N., Rohatgi, U.S. 2005. Application of Fractional Scaling Analysis to Loss of Coolant Accidents (LOCA). Part 3. Component Level Scaling for Peak Clad Temperature. Proceedings of the 11th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics (NURETH-11) Popes' Palace Conference Center, Avignon, France, October 2–6, 2005.
- [18] Boyack, B.E. et al. 2001. NUREG/CR-6744 Appendix C, Phenomenon Identification and Ranking Tables (PIRTs) for Loss-of-Coolant Accidents in Pressurized and Boiling Water Reactors Containing High Burnup Fuel.
- [19] Marcel, C.P., Rohde M., Van der Hagen, T.H.J.J. 2008. Fluid-to-fluid modeling of natural circulation boiling loops for stability analysis, International Journal of Heat and Mass Transfer Volume 51, Issues 3–4, February 2008, pp. 566–575.
- [20] Sandberg, J. (toim.) 2004. Ydinturvallisuus. Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarja 5, Säteilyturvakeskus. 190 s.
- [21] ROSA-V Large Scale Test Facility (LSTF) System Description for the Third and Fourth Simulated Fuel Assemblies, JAERI-Tech 2003-037.
- [22] Kremin, H., Limprecht, H., Güneysu, R., Umringer, K. 2001. Description of the PKL III Test Facility. Technical Center of Framatome ANP Erlangen, Germany. 79 s.
- [23] Olkiluoto 3 "EPR – Characteristics" [Areva] Saatavissa: <http://www.ol3.areva-np.com/epr/characteristics.htm> [Viitattu 3.5.2008]
- [24] World Nuclear Industry Handbook 2008, Nuclear Engineering International
- [25] Ahley, R., El-Shanawany, M., Eltawila, F., D'Auria, F. Good Practices for User Effect Reduction THICKET2004 OECD Nuclear energy Agency Status Report (NEA/CSNI/R (98)22).
- [26] Junninen, P. 2005. Laskentamalli PKL-koelaitteiston pienen vuodon kokeen simuloimiseksi Apros-ohjelmistolla. Diplomityö.
- [27] Inkinen, P. 2007. ROSA/LSTF-koelaitteiston mallinnus APROS-ohjelmistolla. Tutkimusraportti VTT.
- [28] Mull, Thomas. Test PKL III F1.2: Inherent Boron Dilution due to Reflux-Condenser Conditions as a Function of the Primary Coolant Inventory (RCS Pressure: 12 bar), Test Report. Areva NP, Erlangen, Germany. 2007, pp. 1–75.

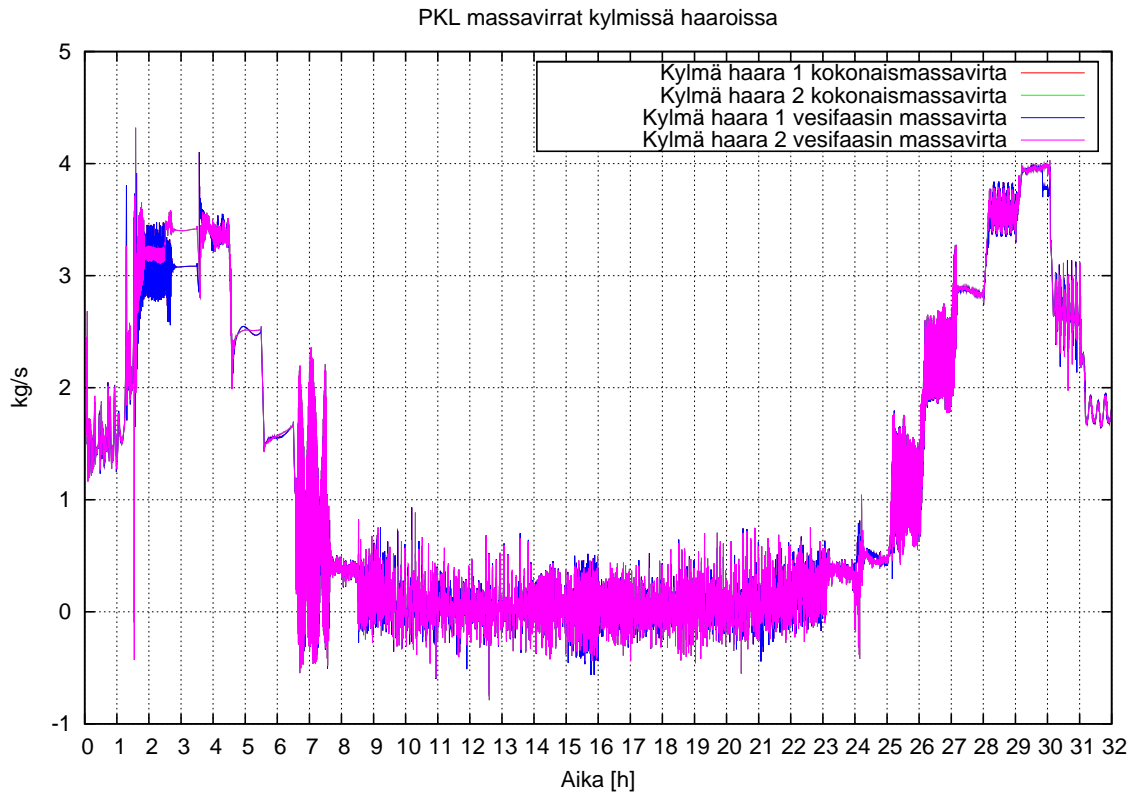
LIITE 1 Kuvat PKL-laskennasta



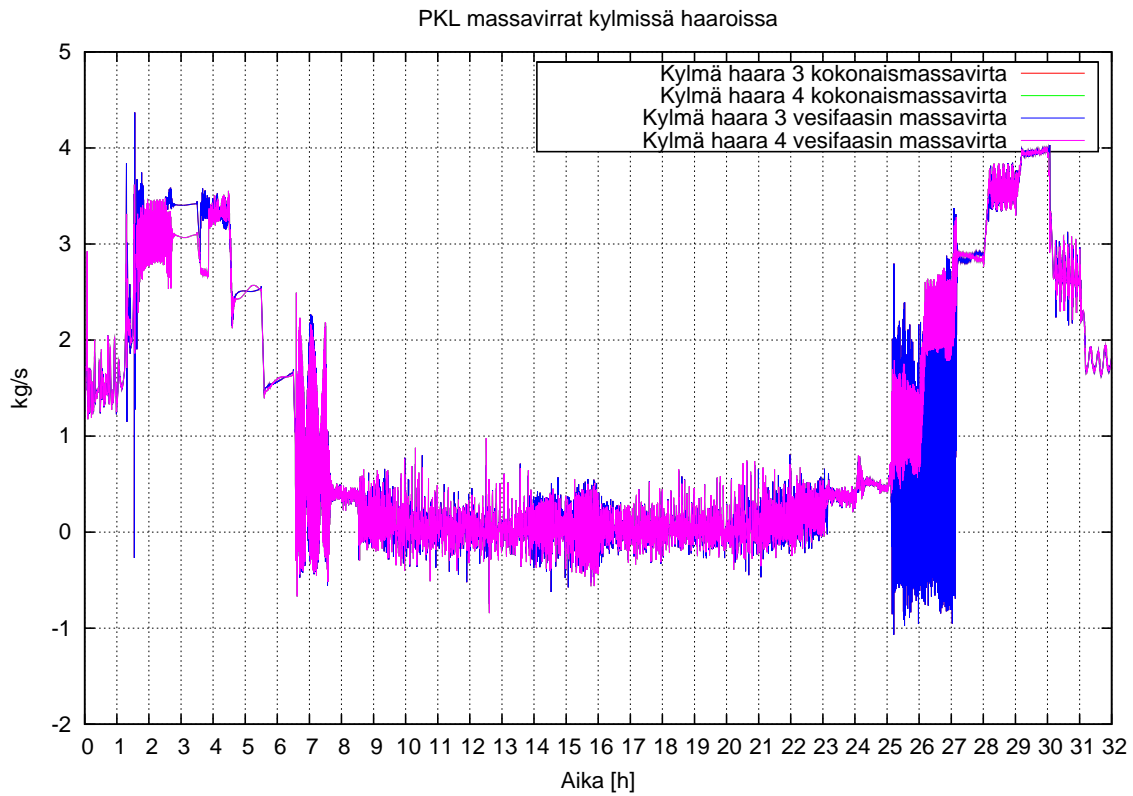
Kuva L1-1. PKL massavirrat kuumissa haaroissa 1 ja 2.



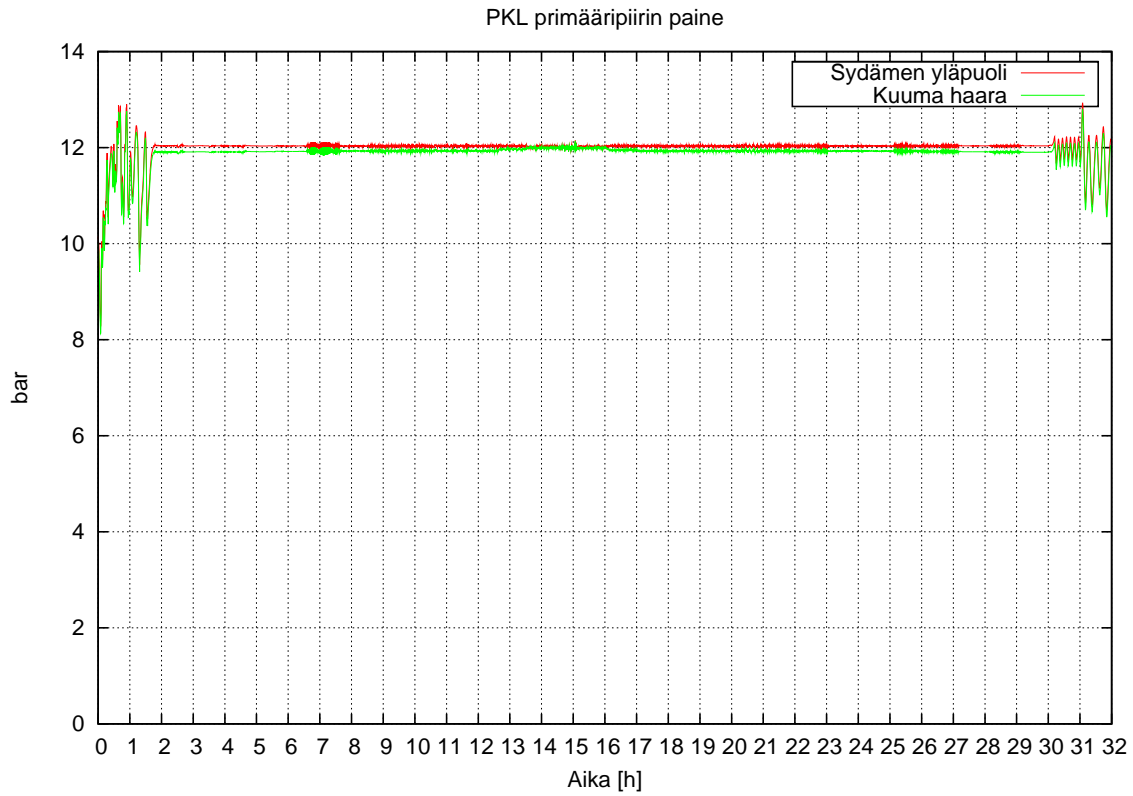
Kuva L1-2. PKL massavirrat kuumissa haaroissa 3 ja 4.



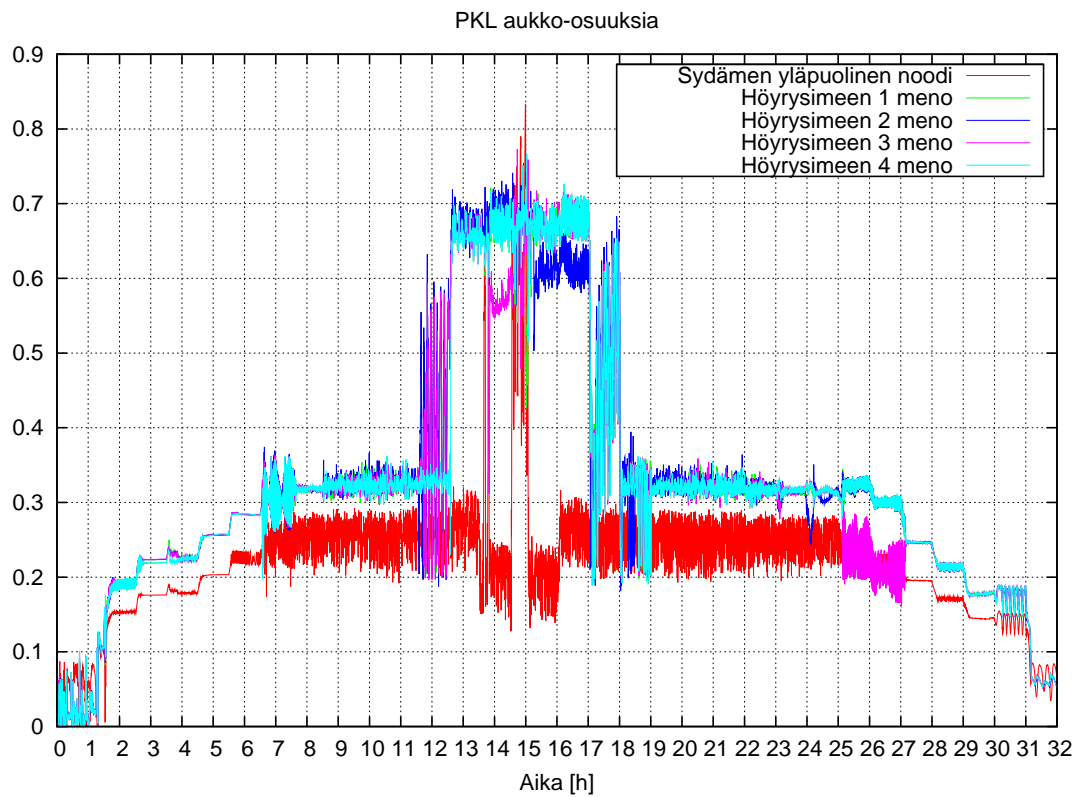
Kuva L1-3. PKL massavirrat kylmissä haaroissa 1 ja 2.



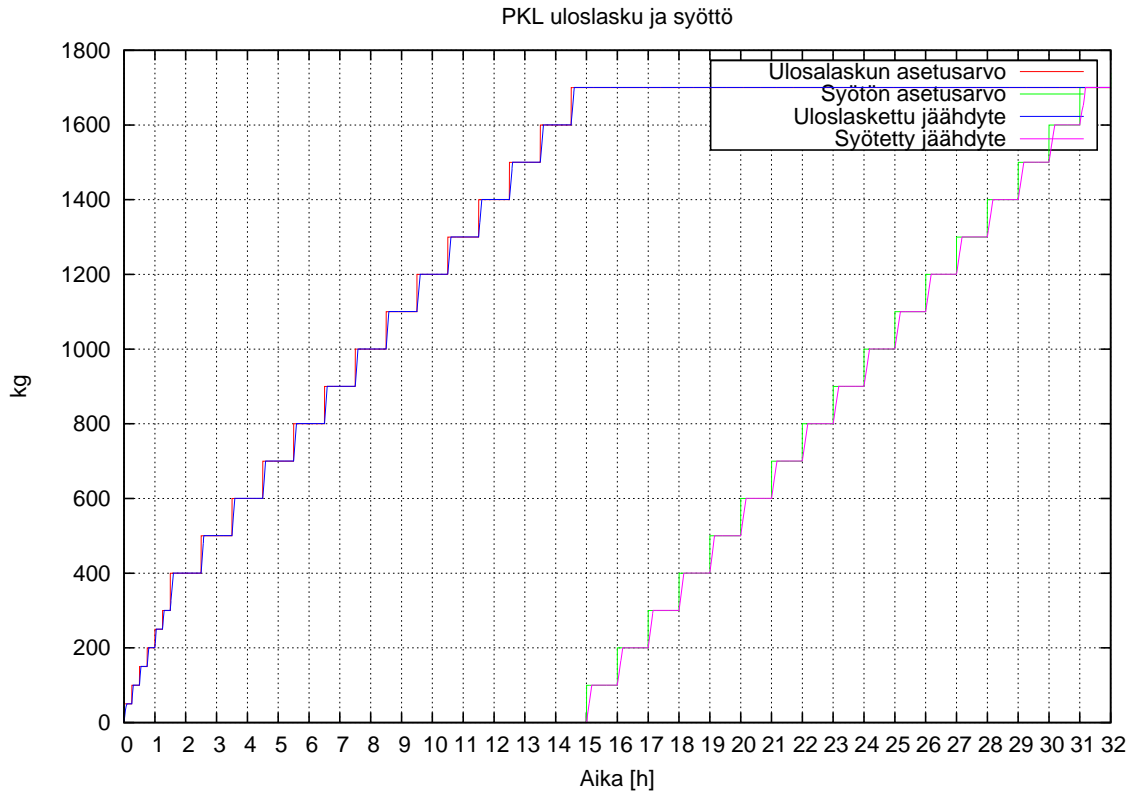
Kuva L1-4. PKL massavirrat kylmissä haaroissa 3 ja 4.



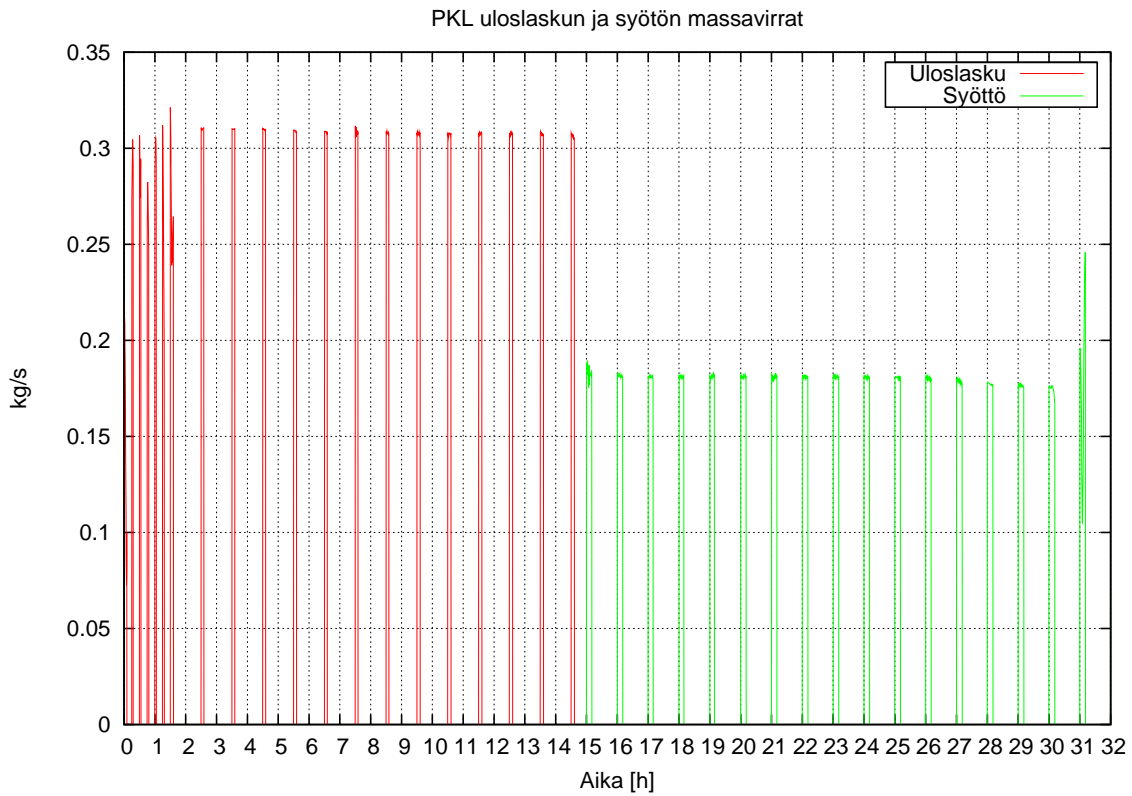
Kuva L1-5. PKL primääripiirin paineita.



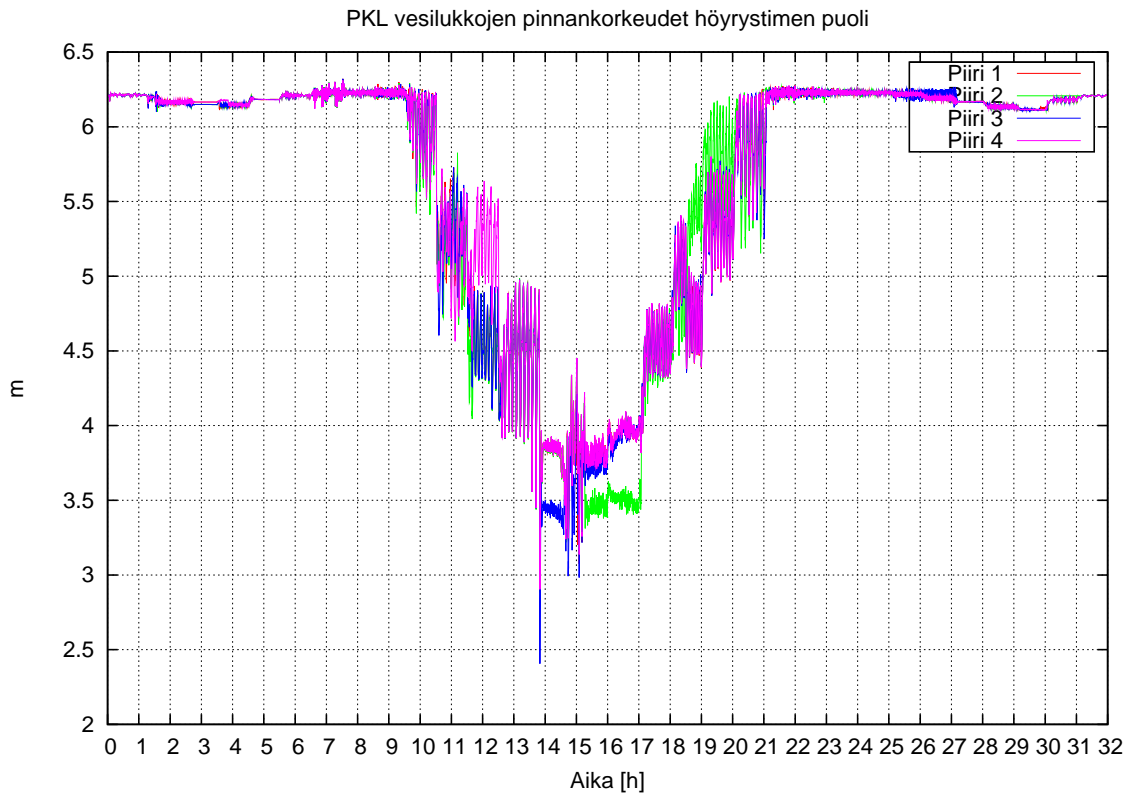
Kuva L1-6. PKL aukko-osuuksia.



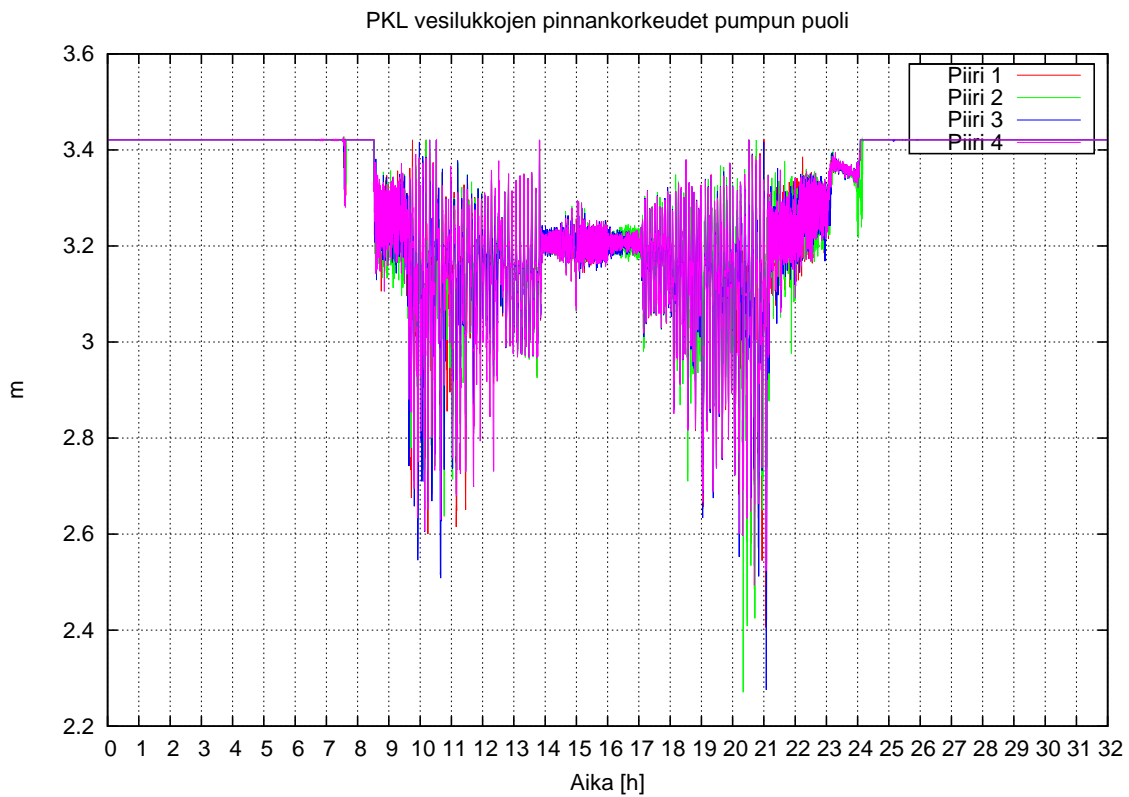
Kuva L1-7. PKL uloslasku ja syöttö.



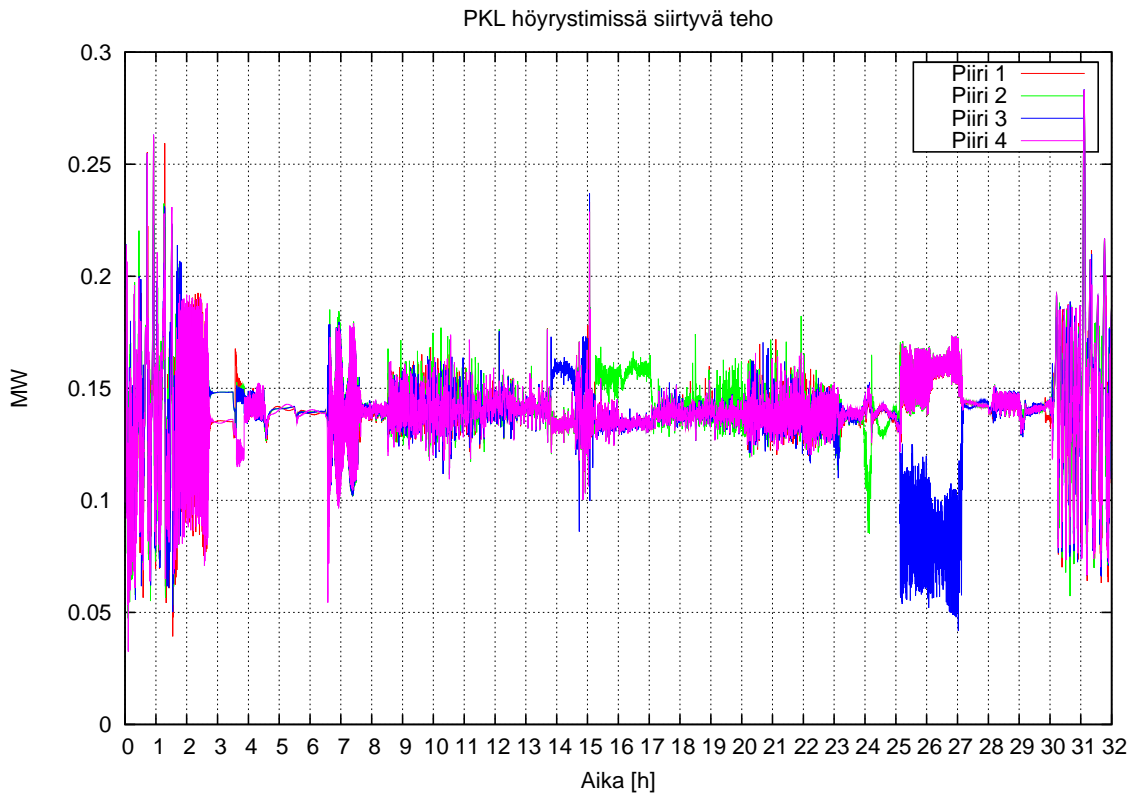
Kuva L1-8. PKL uloslaskun ja syötön massavirrat.



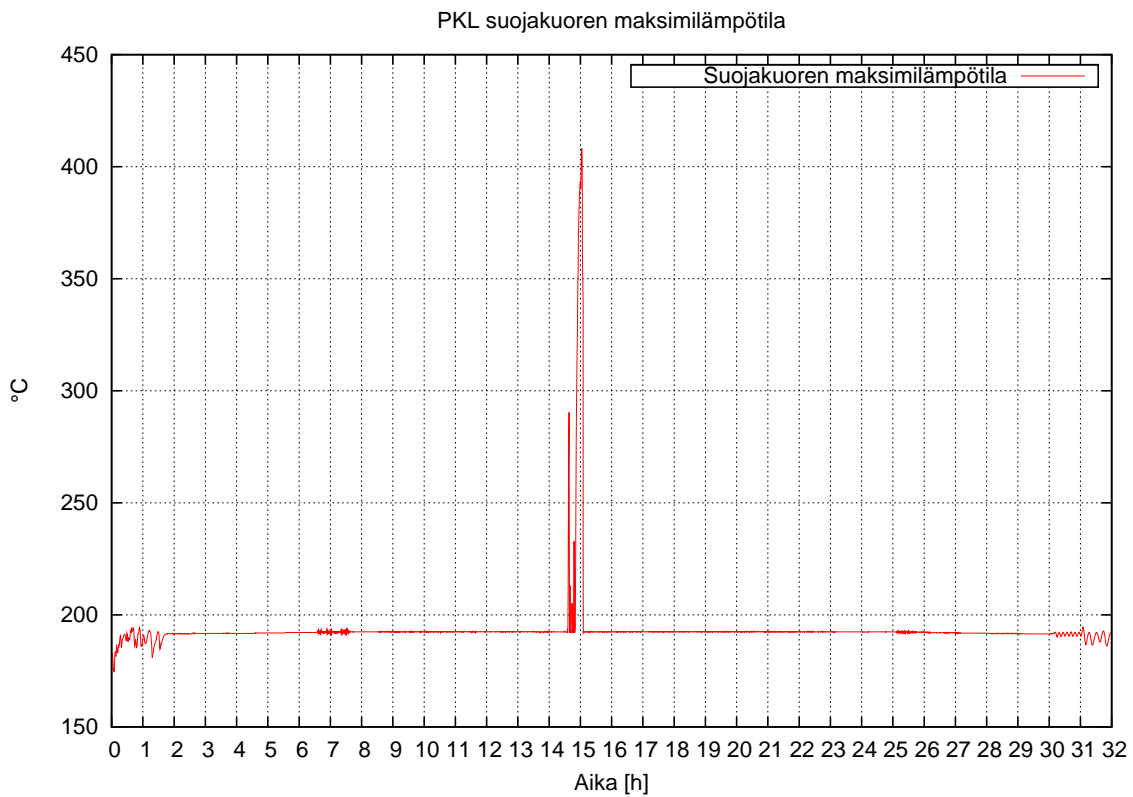
Kuva L1-9. PKL vesilukkojen pinnankorkeuksia höyrystimen puolelta.



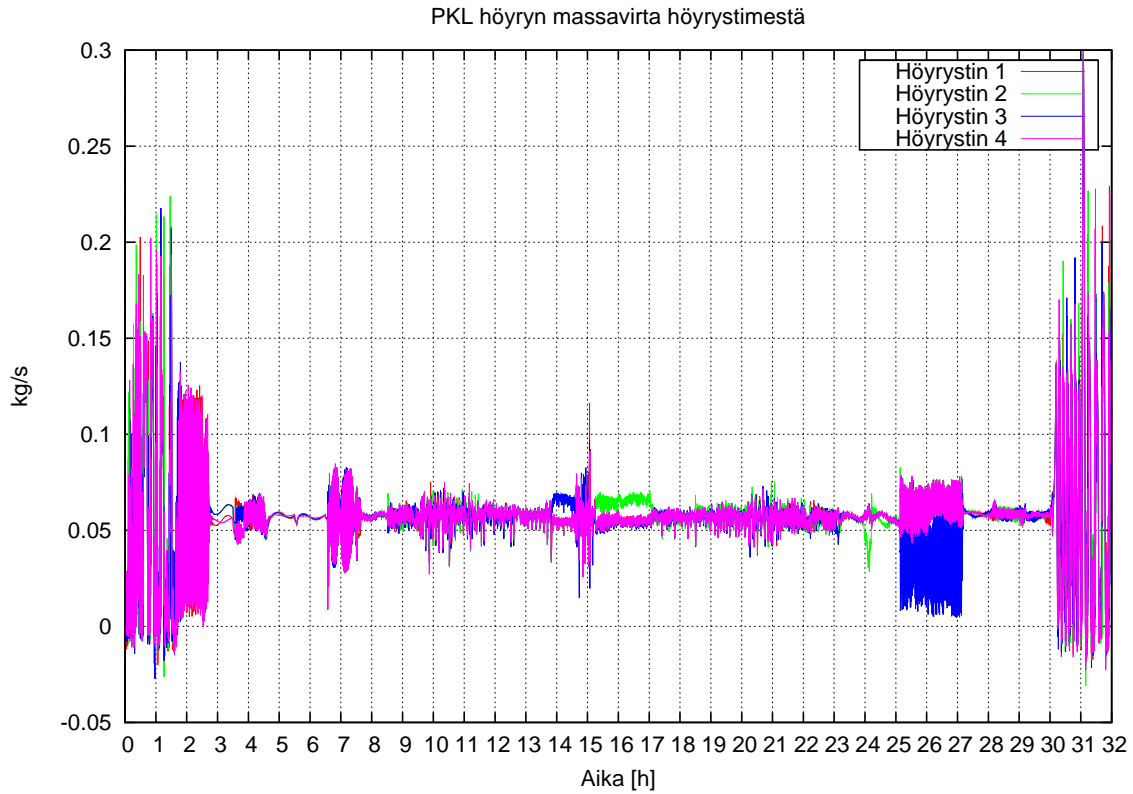
Kuva L1-10. PKL vesilukkojen pinnankorkeuksia pumpun puolelta.



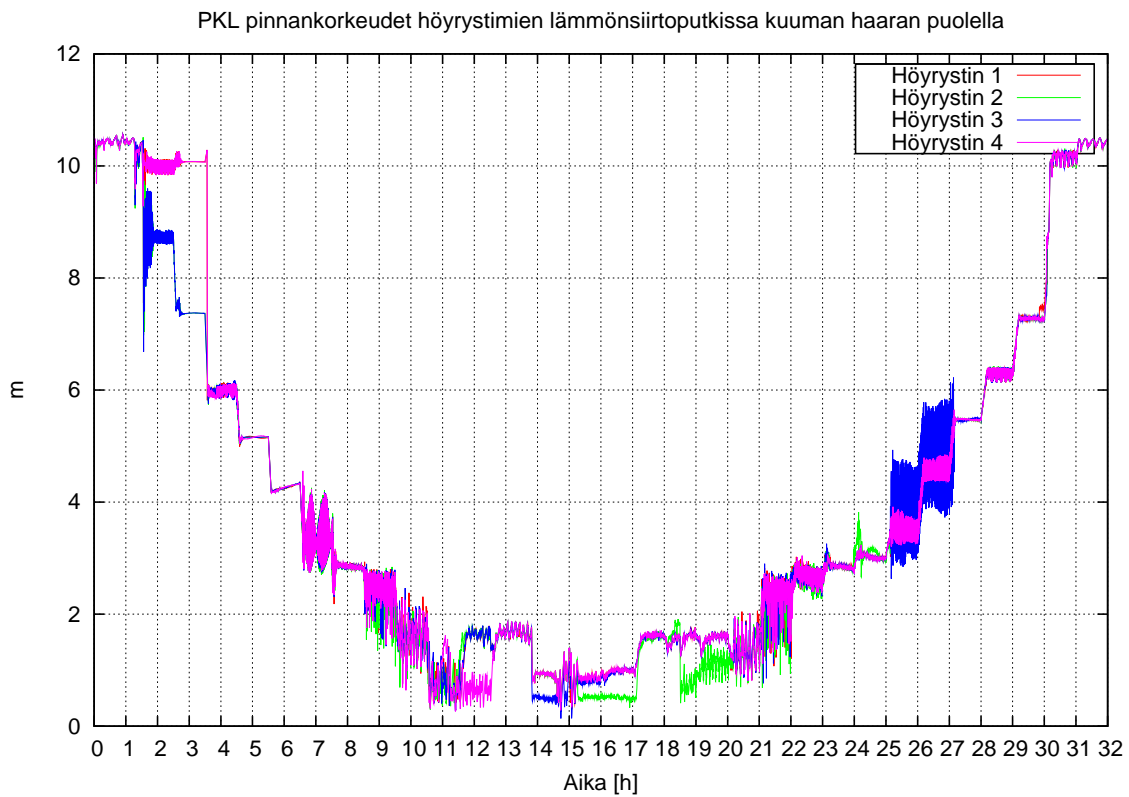
Kuva L1-11. PKL höyrystimissä siirtyvä teho.



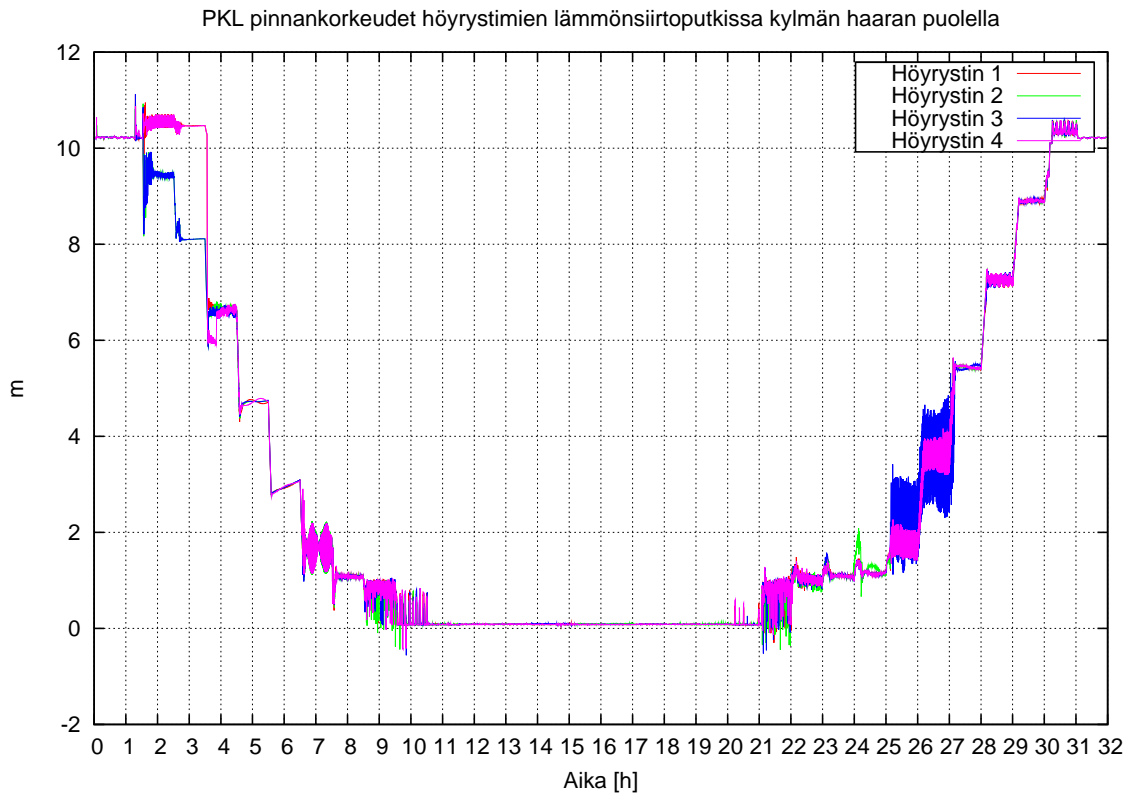
Kuva L1-12. PKL suojakuoren maksimilämpötila.



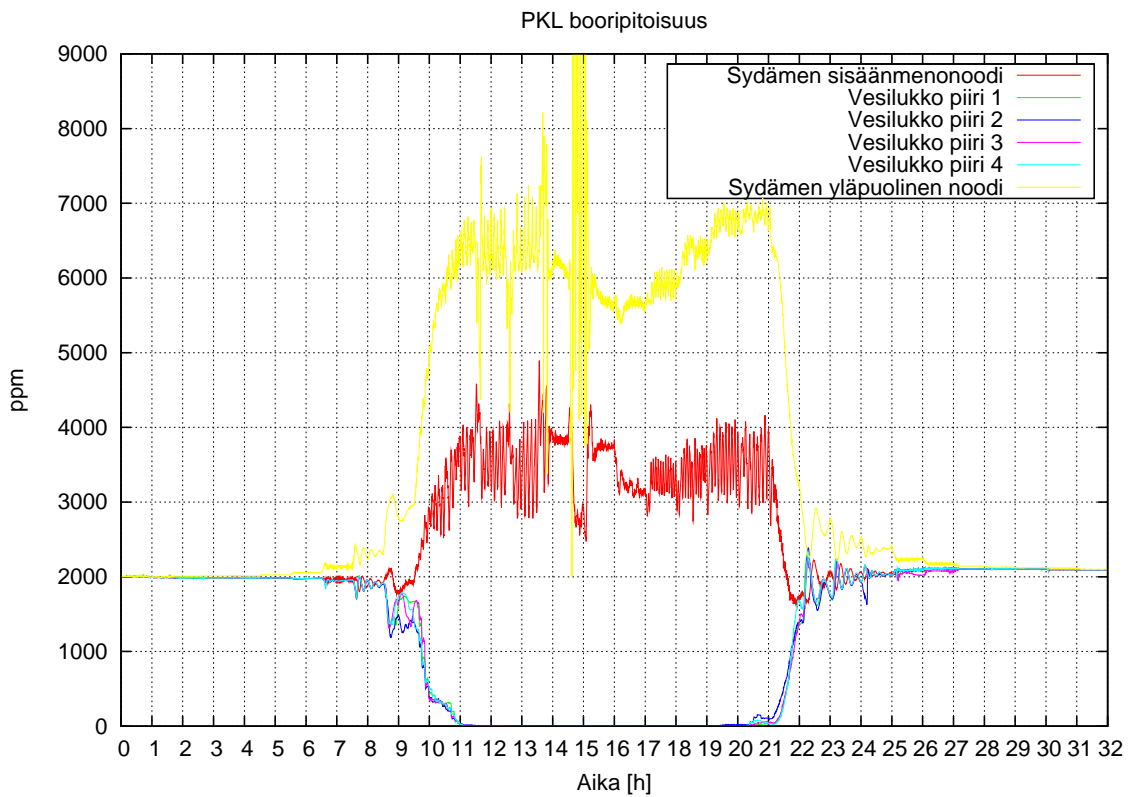
Kuva L1-13. PKL höyryn massavirta höyrystimistä.



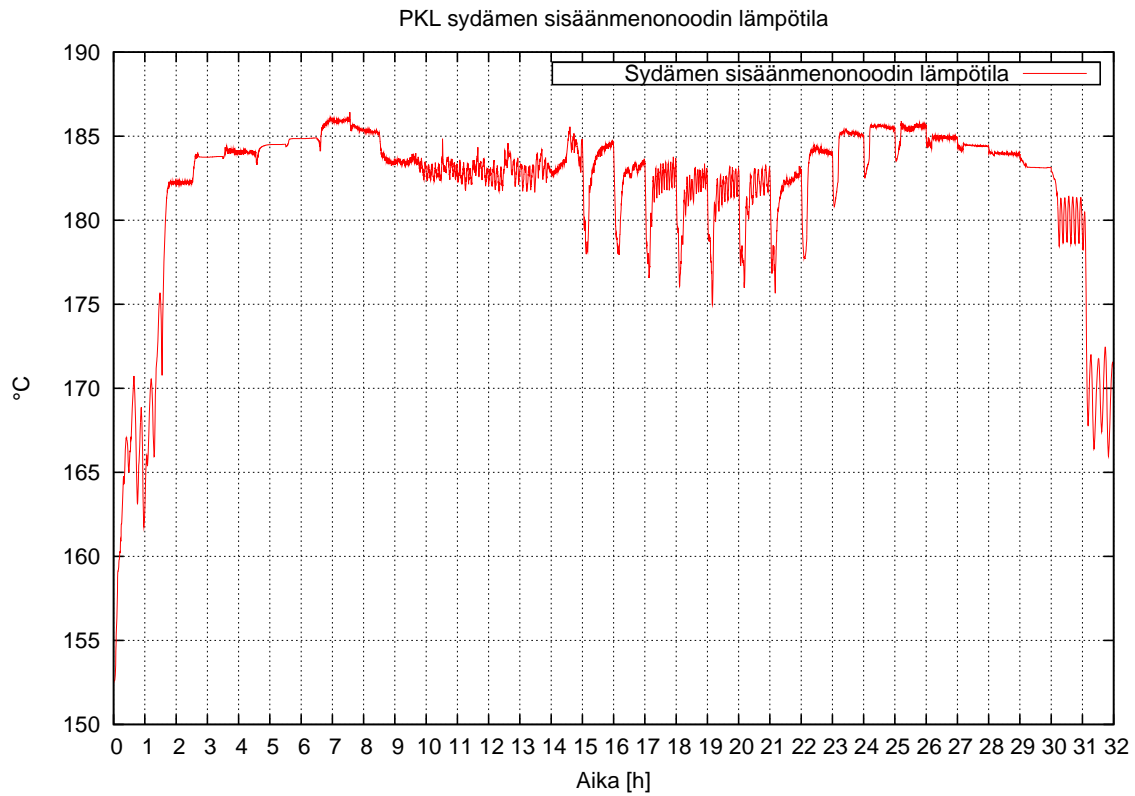
Kuva L1-14. PKL höyrystimien lämmönsiirtoputkien pinnankorkeuksia kuuman haaran puolelta.



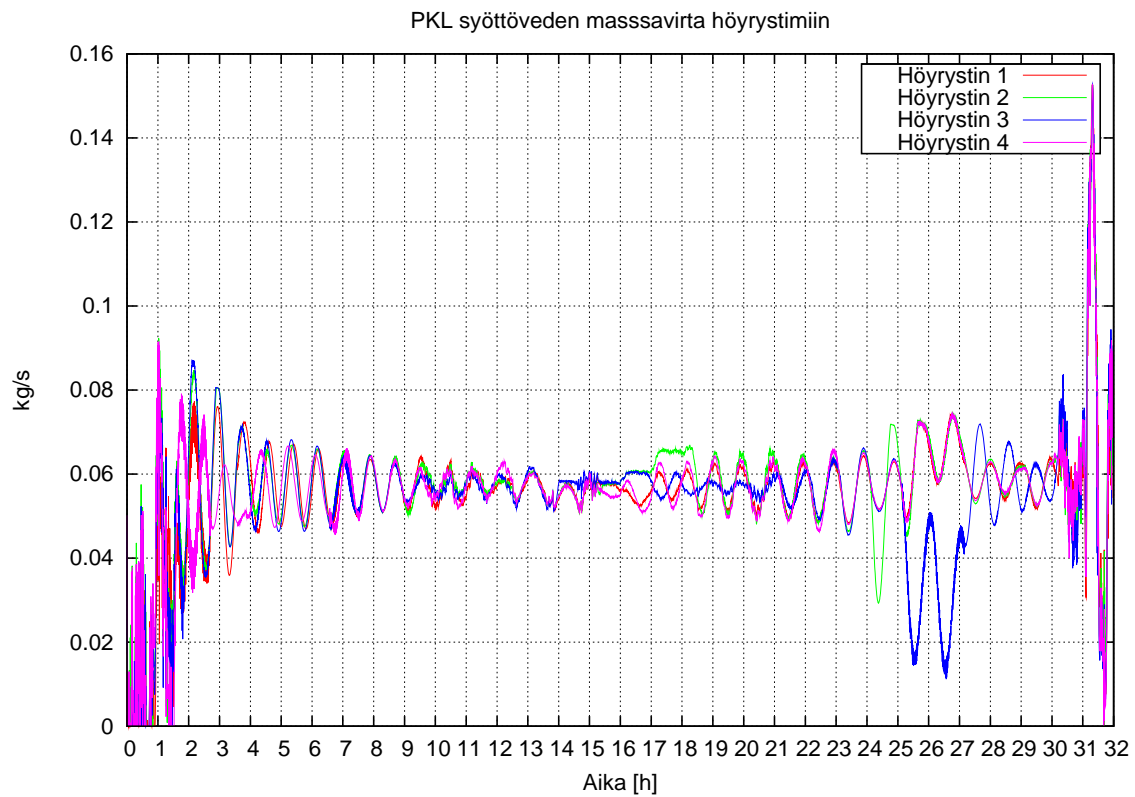
Kuva L1-15. PKL höyrystimien lämmönsiirtoputkien pinnankorkeuksia kylmän haaran puolelta.



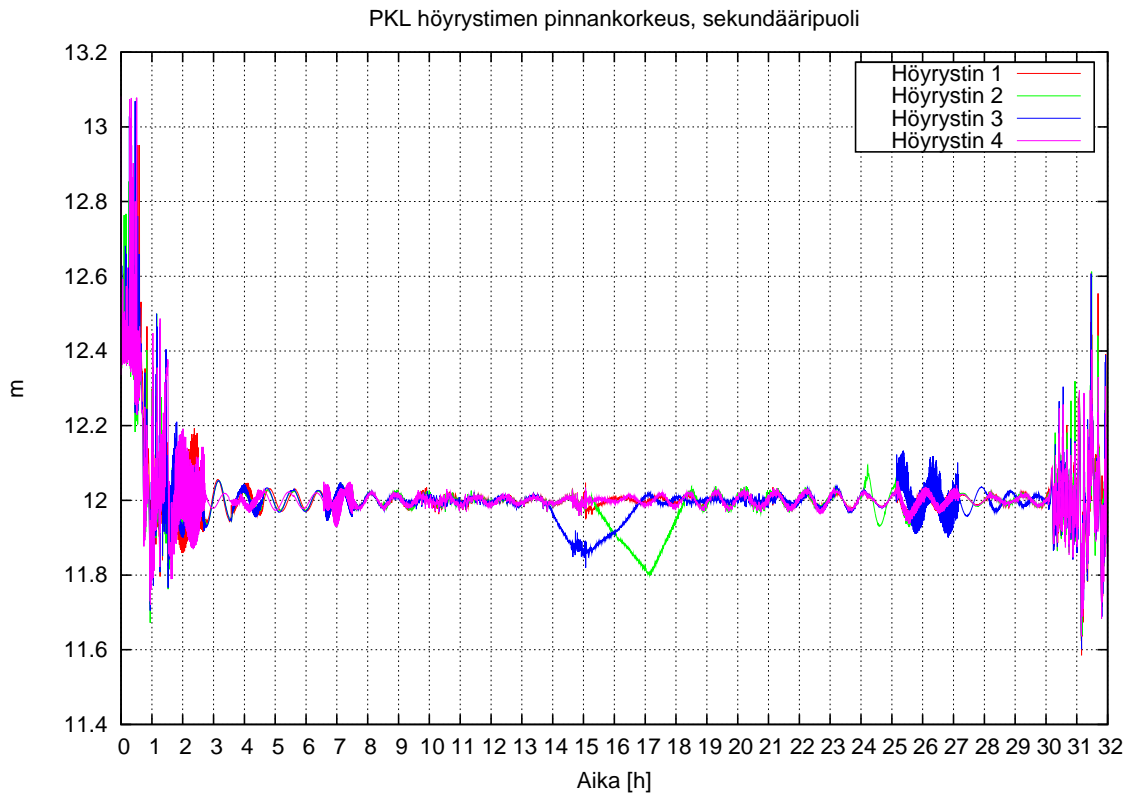
Kuva L1-16. PKL booripitoisuuksia primääripiirissä.



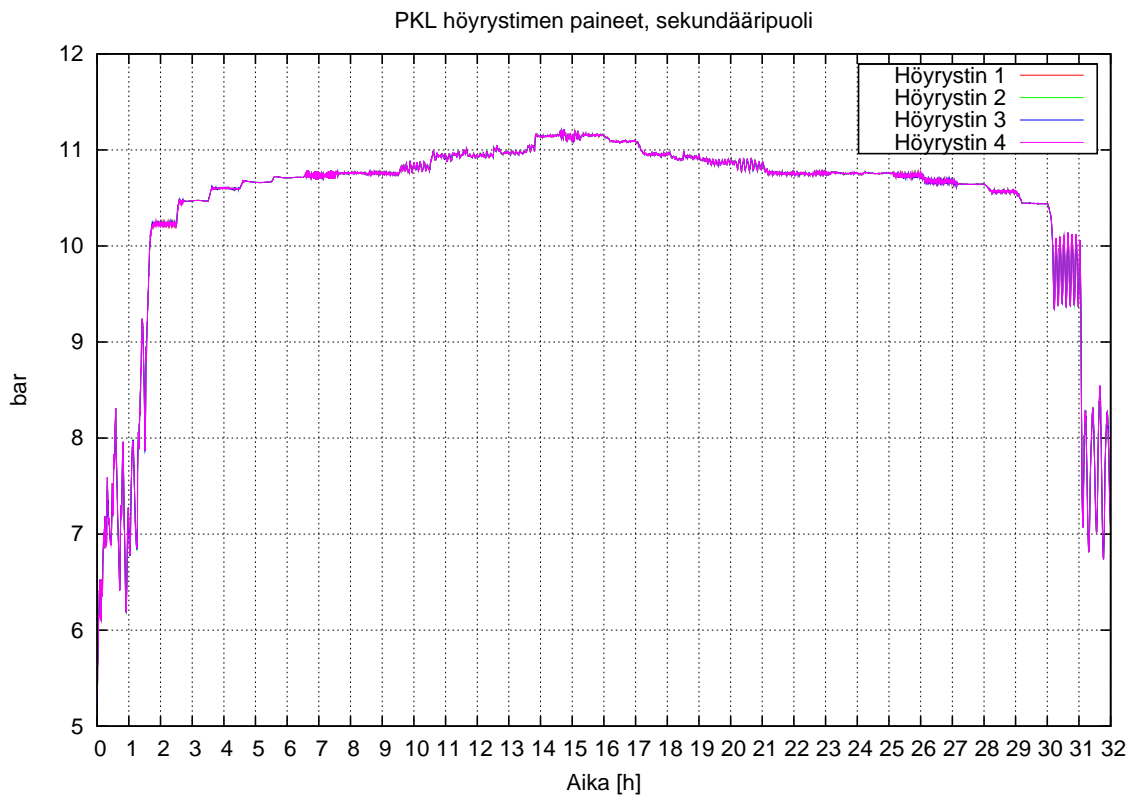
Kuva L1-17. PKL sydämen sisäänmenonoodin lämpötila.



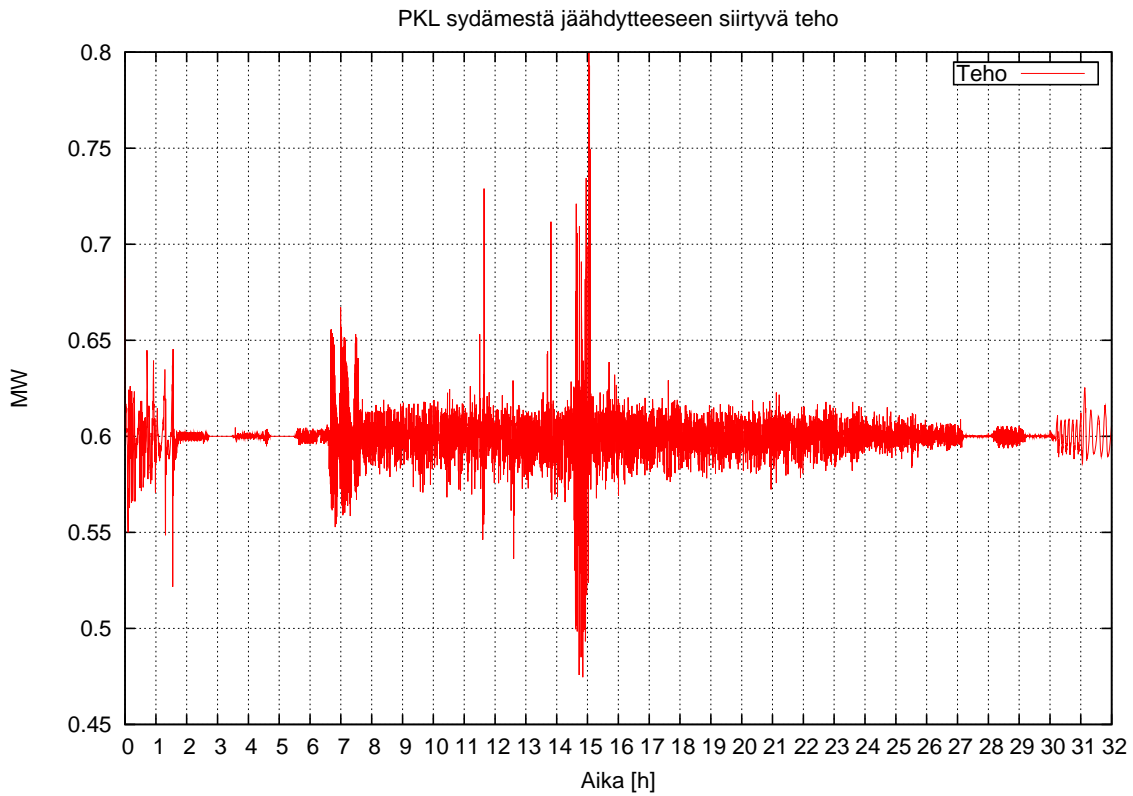
Kuva L1-18. PKL syöttöveden massavirta höyrystimiin.



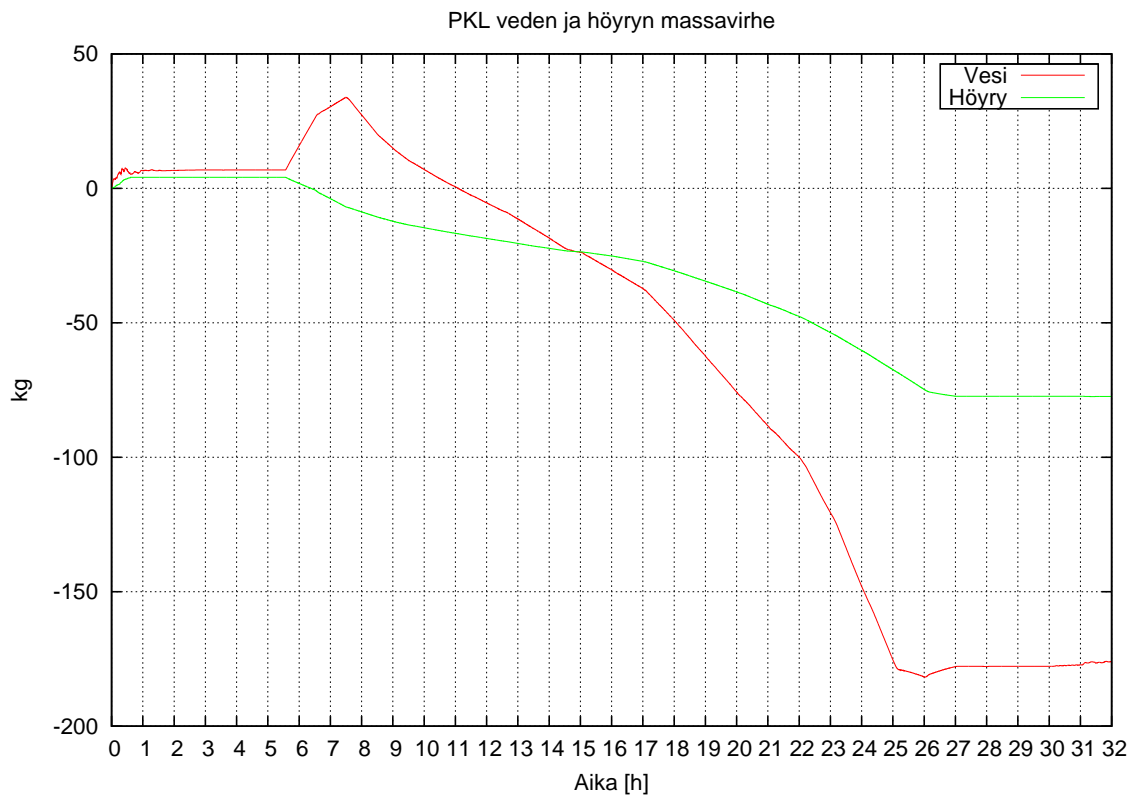
Kuva L1-19. PKL höyrystimien sekundääripuolen pinnankorkeuksia.



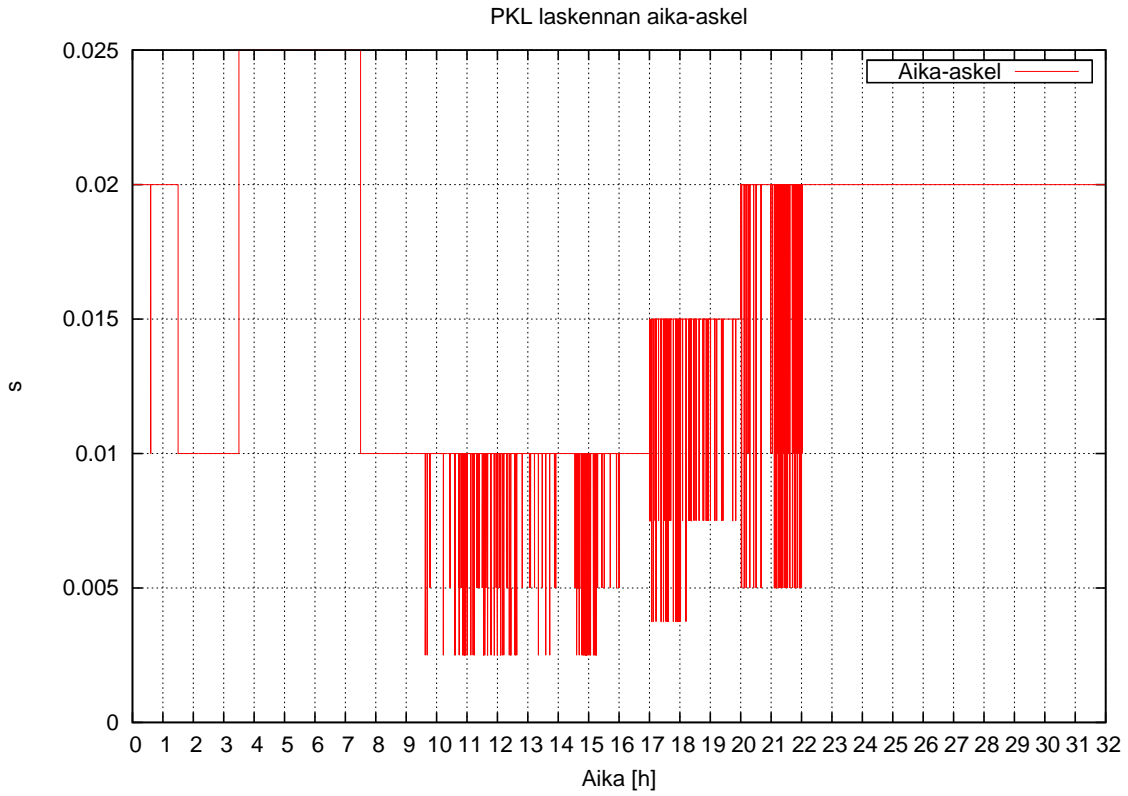
Kuva L1-20. PKL höyrystimien paineita sekundääripuolelta.



Kuva L1-21. PKL sydäimestä jäähdytteeseen siirtyvä teho.

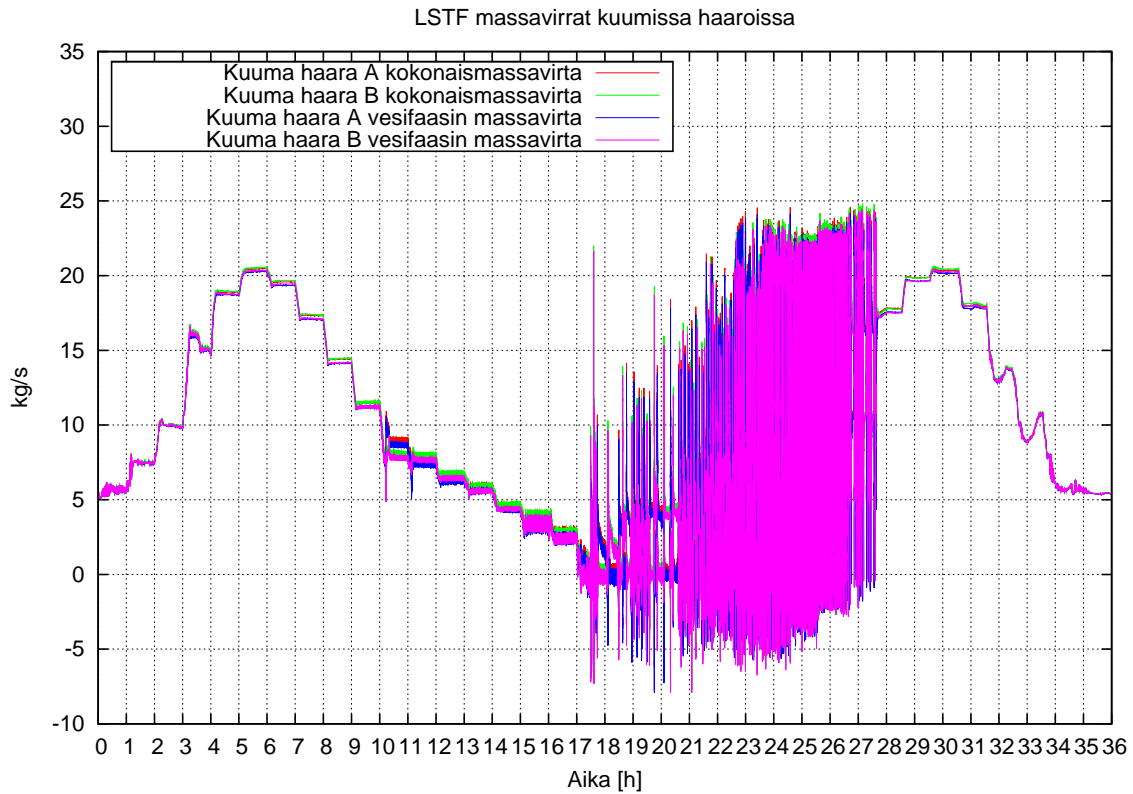


Kuva L1-22. PKL veden ja höyryn massavirhe.

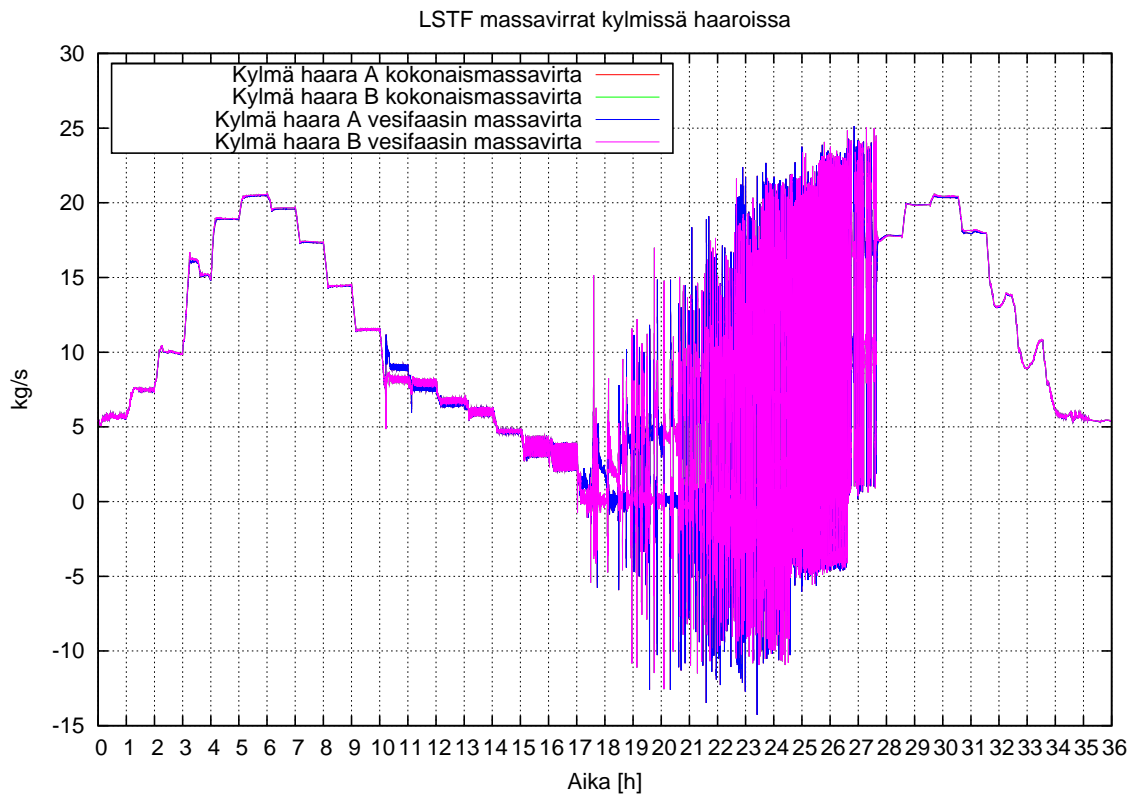


Kuva L1-23. PKL laskennan aika-askel.

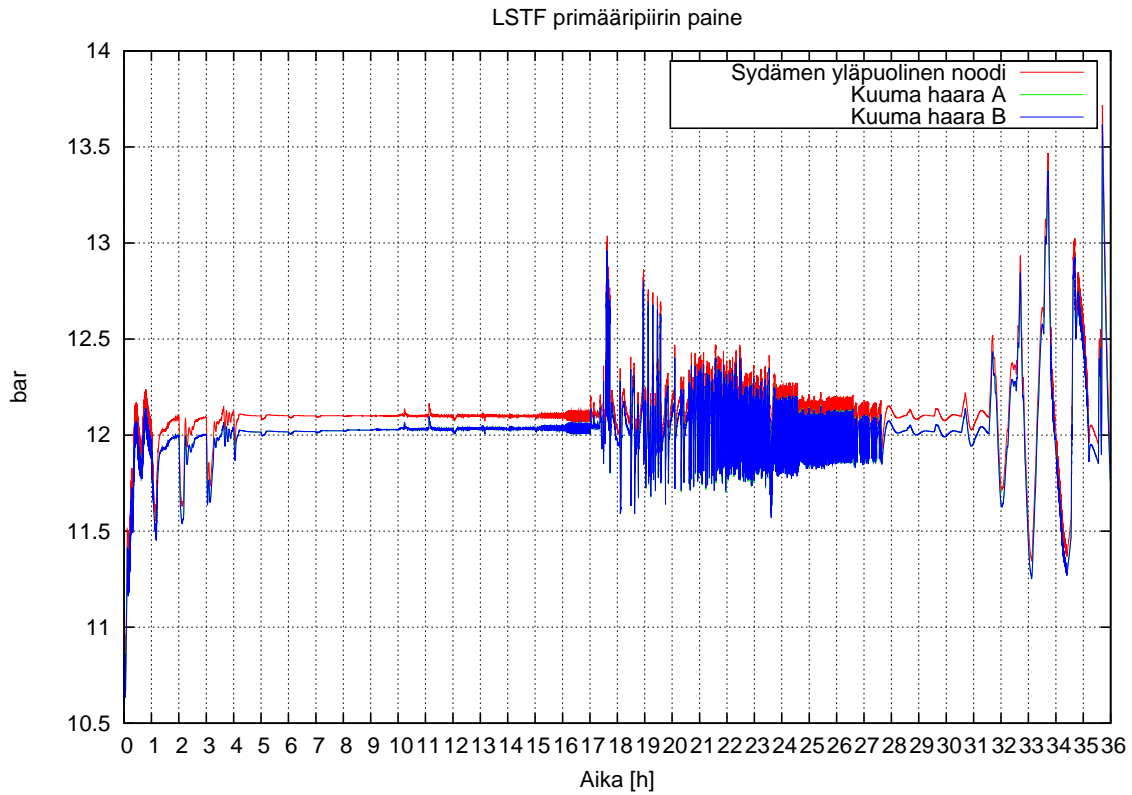
LIITE 2 Kuvat LSTF-laskennasta



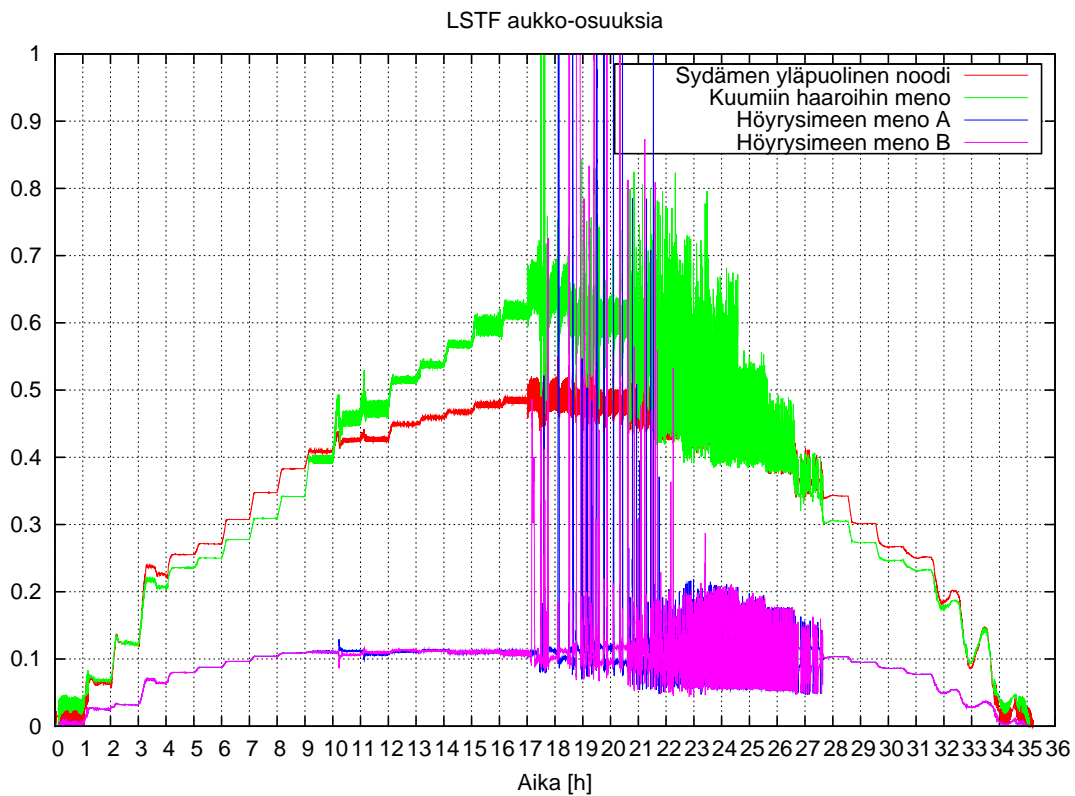
Kuva L2-1. LSTF massavirrat kuumissa haaroissa.



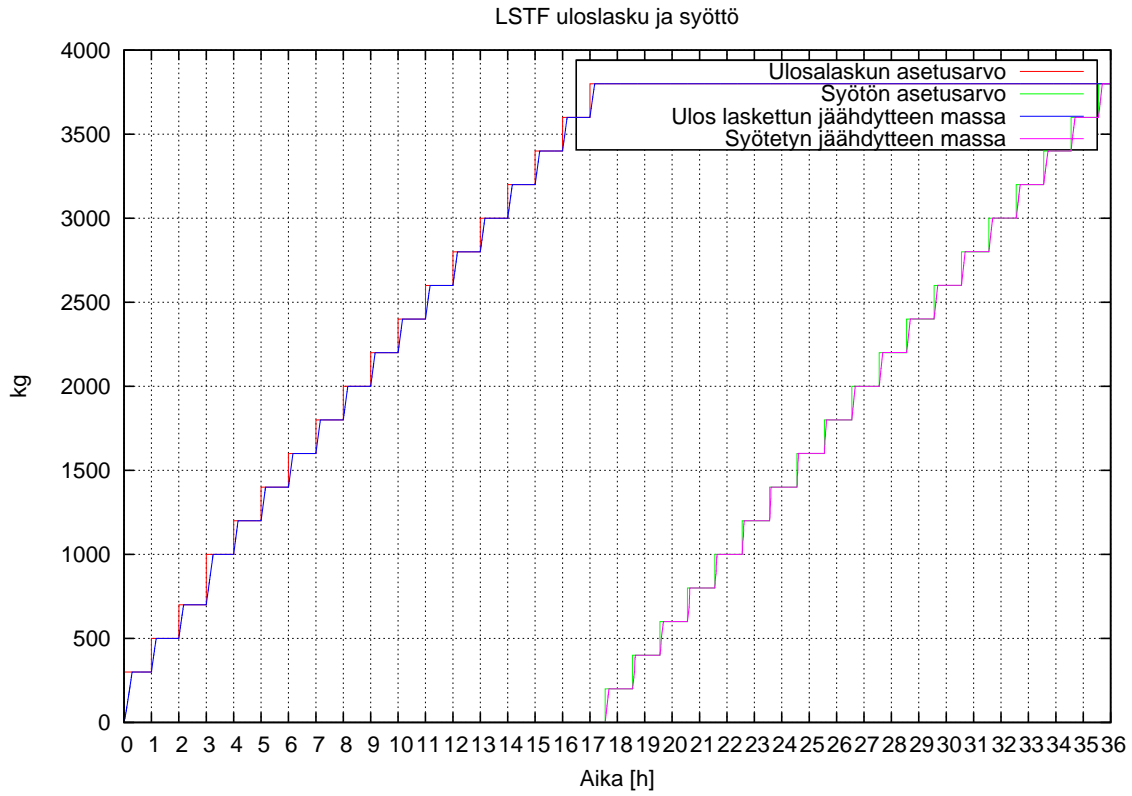
Kuva L2-2. LSTF massavirrat kylmissä haaroissa.



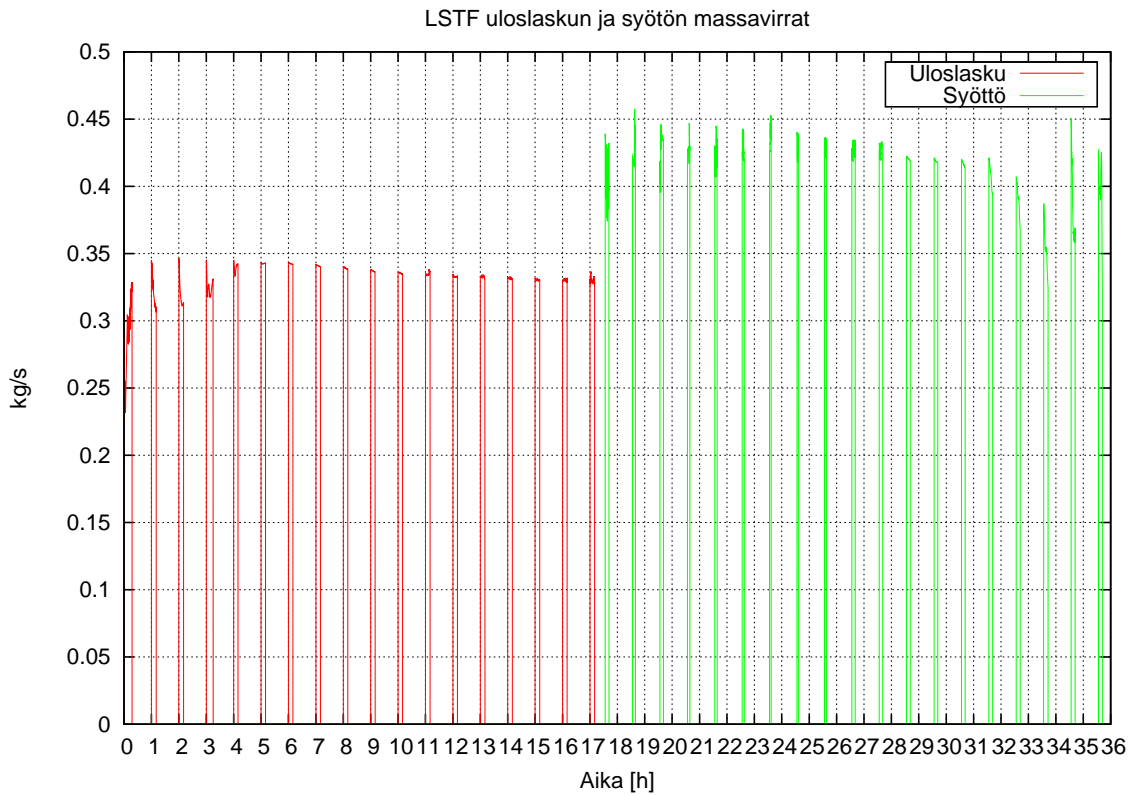
Kuva L2-3. LSTF primääripiirin paineita.



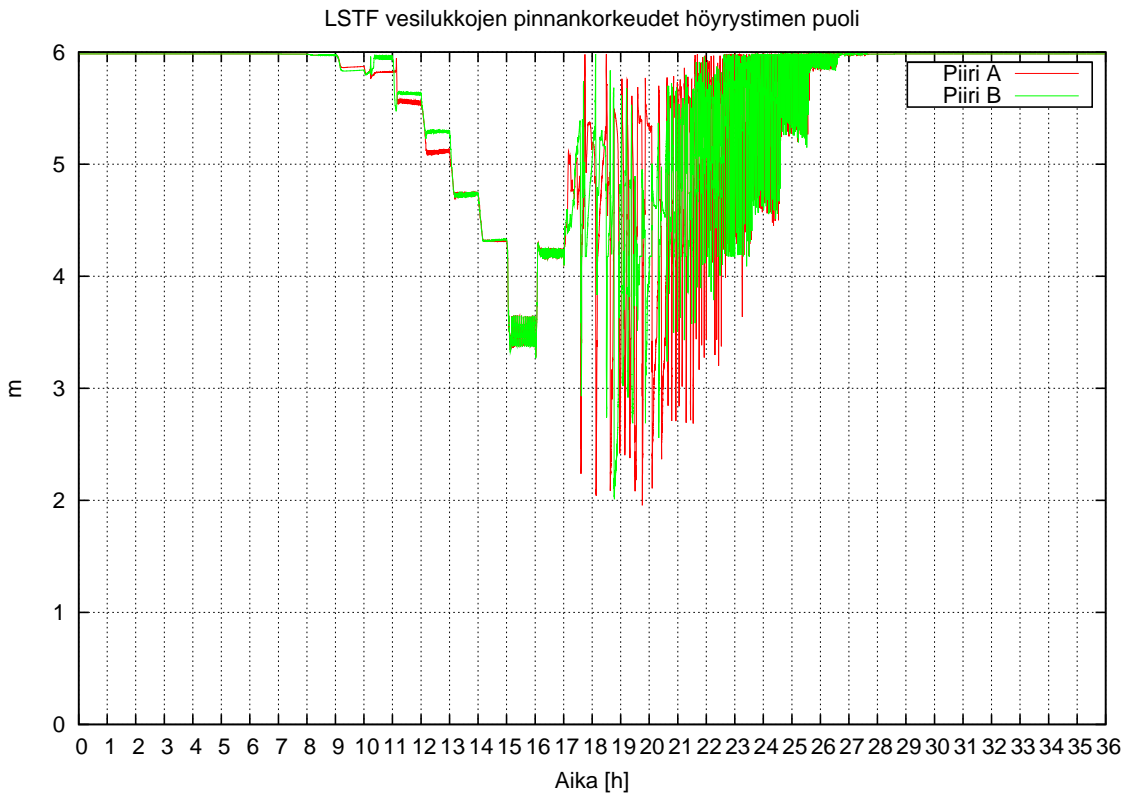
Kuva L2-4. LSTF aukko-osuuksia.



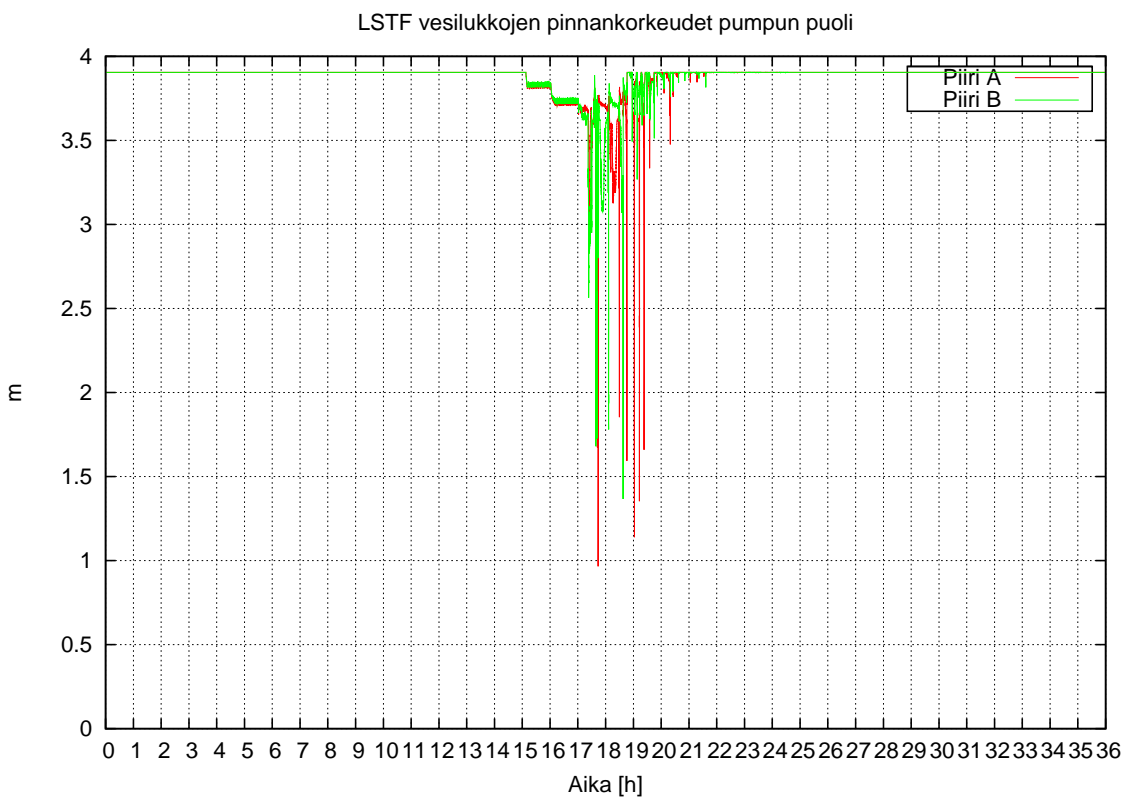
Kuva L2-5. LSTF uloslasku ja syöttö.



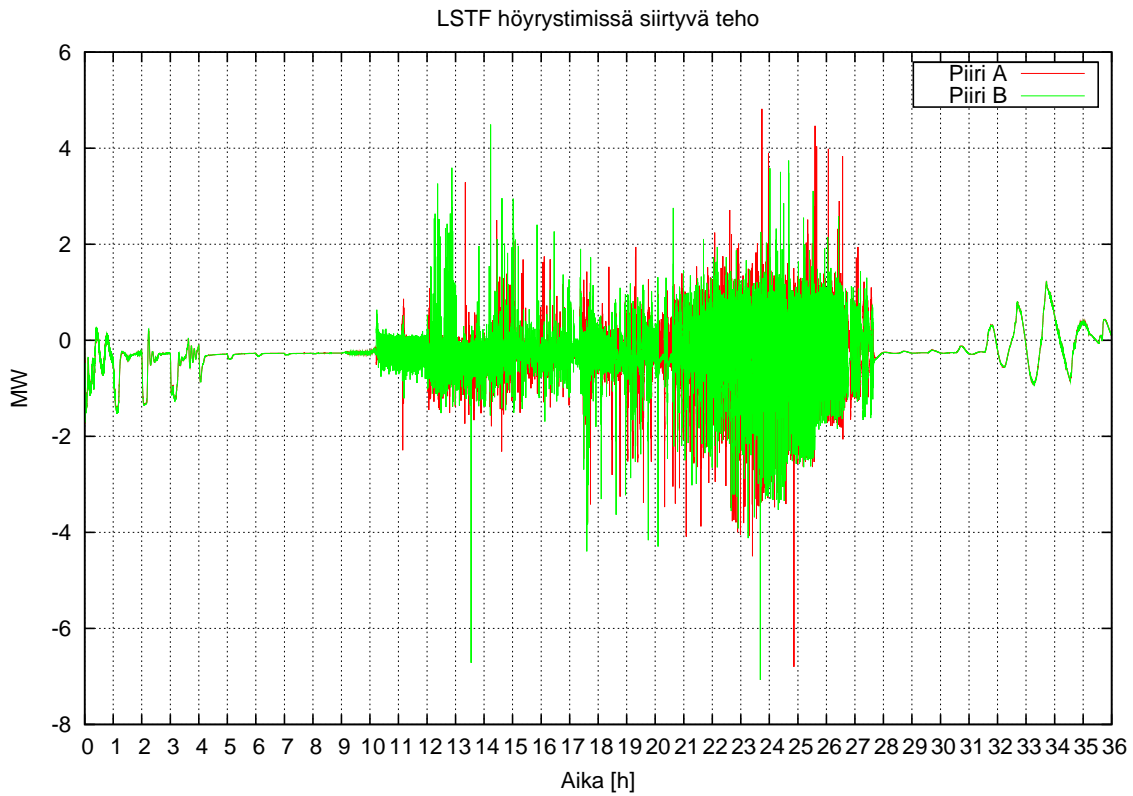
Kuva L2-6. LSTF uloslaskun ja syötön massavirrat.



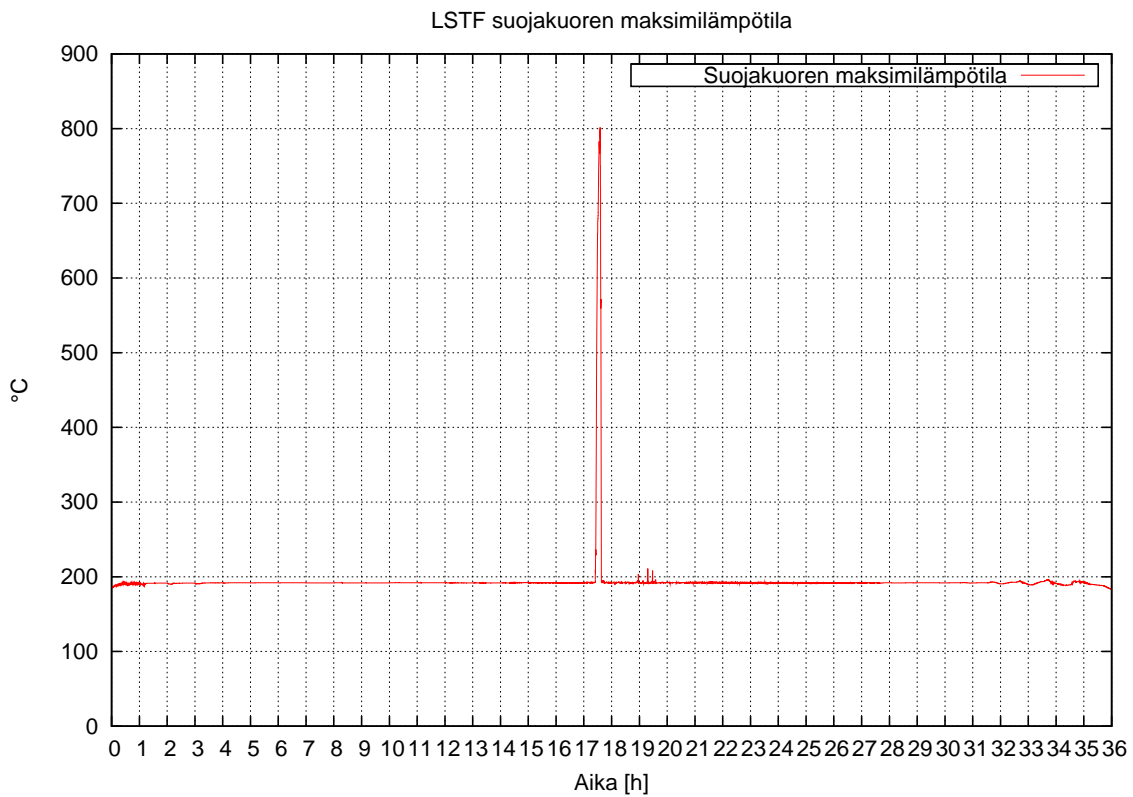
Kuva L2-7. LSTF vesilukkojen pinnankorkeuksia höyrystimen puolelta.



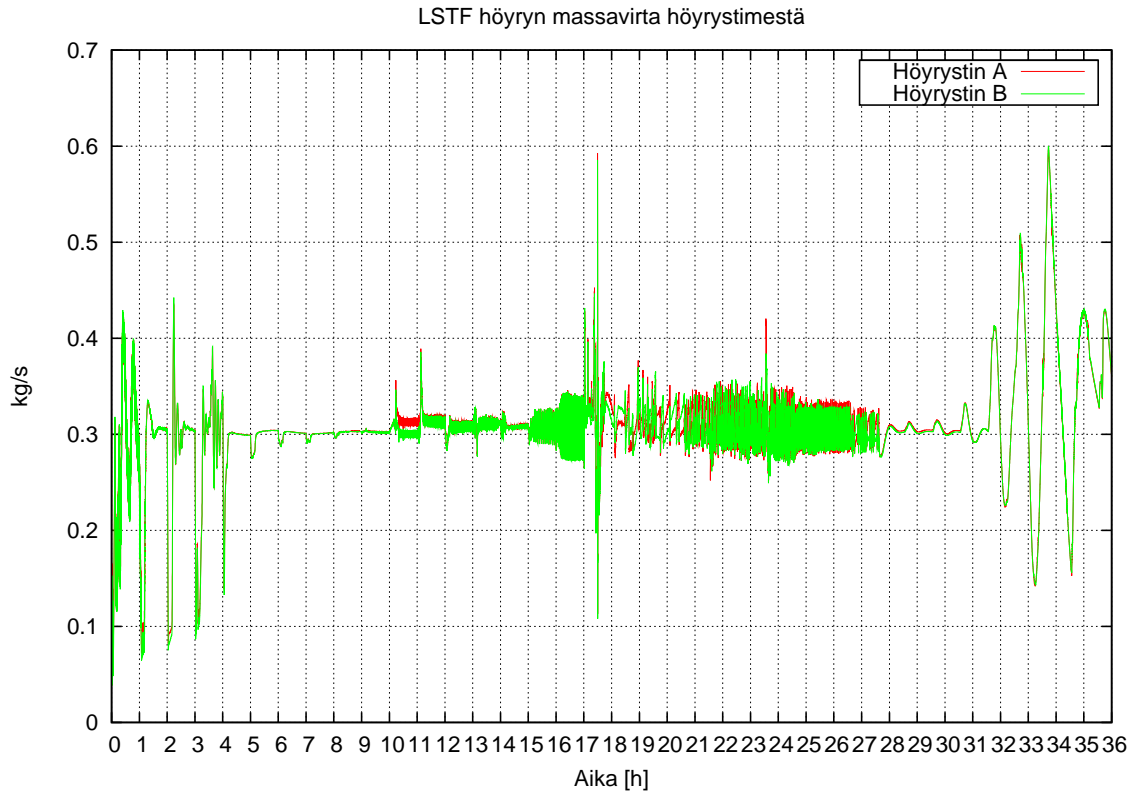
Kuva L2-8. LSTF vesilukkojen pinnankorkeuksia pumpun puolelta.



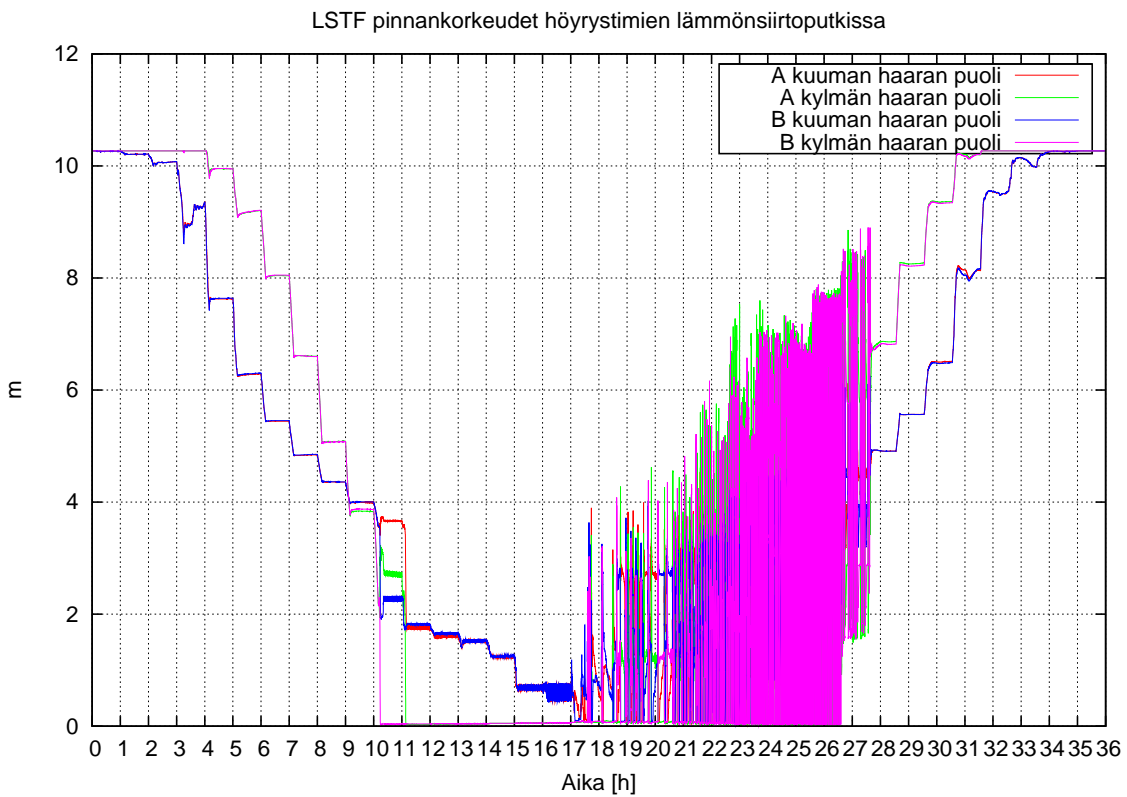
Kuva L2-9. LSTF höyrystimissä siirtyvä teho.



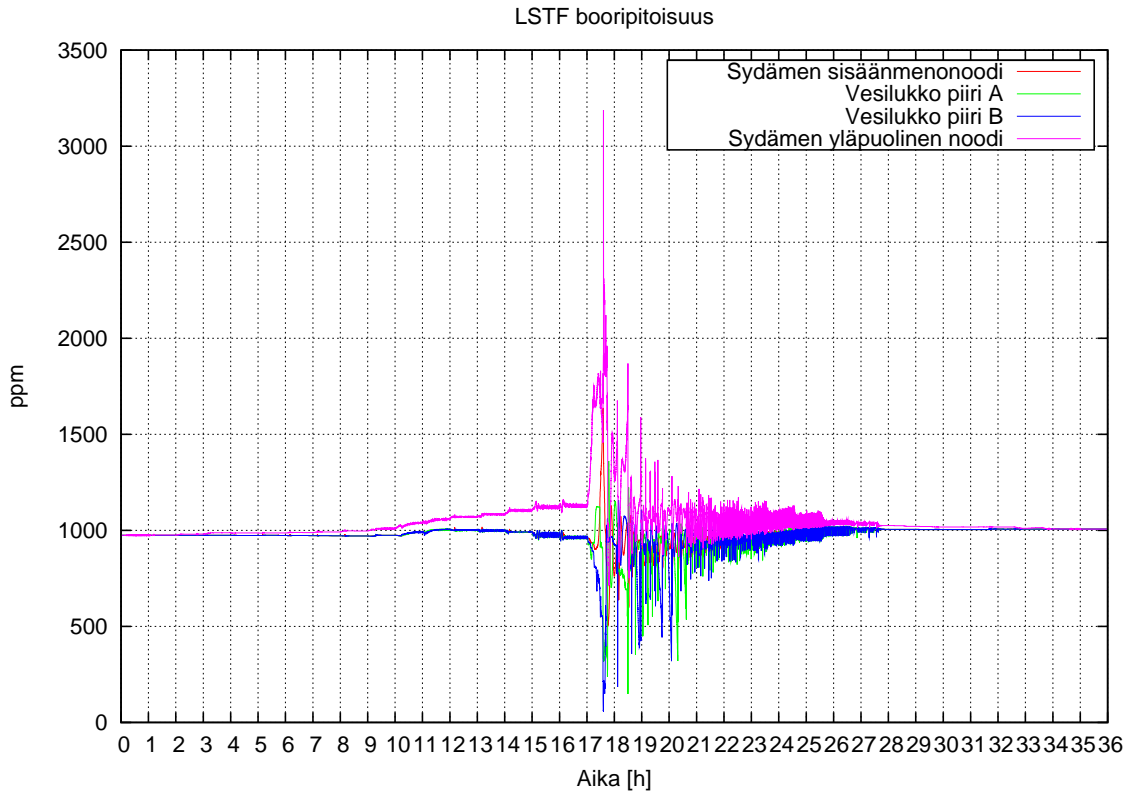
Kuva L2-10. LSTF suojakuoren maksimilämpötila.



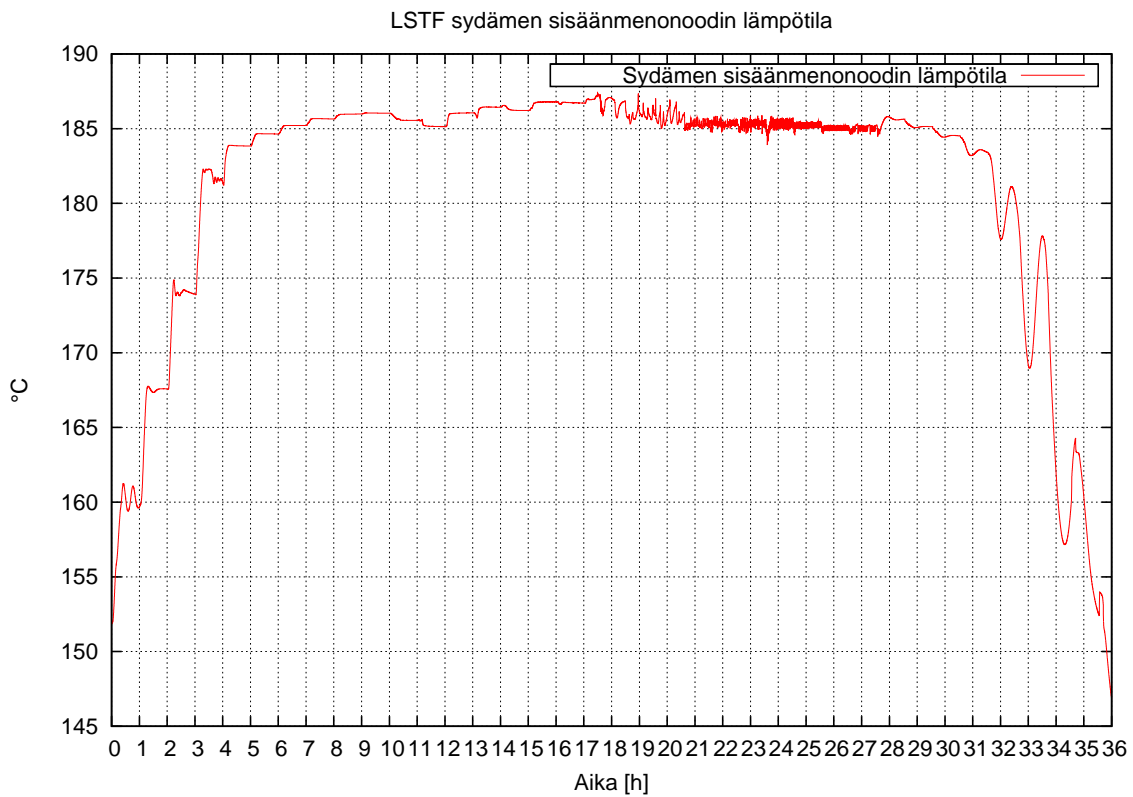
Kuva L2-11. LSTF höyrin massavirta höyrystimestä.



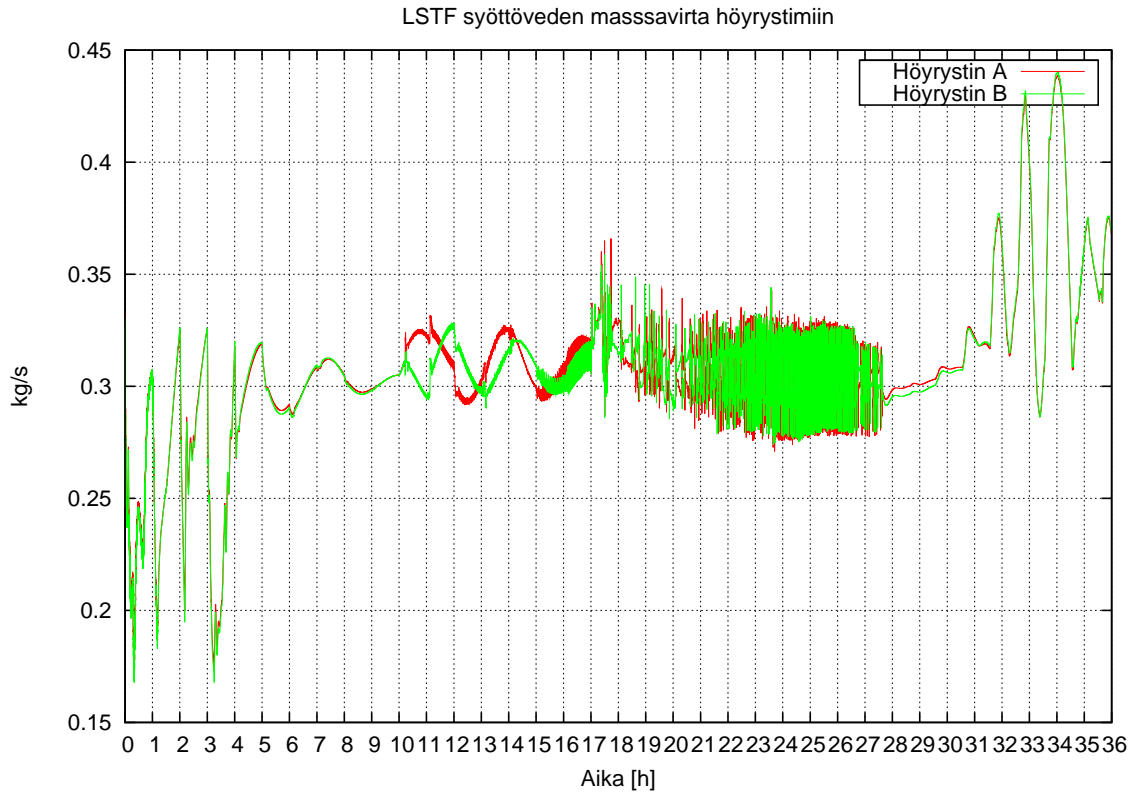
Kuva L2-12. LSTF höyrystimien lämmönsiirtoputkien pinnankorkeuksia.



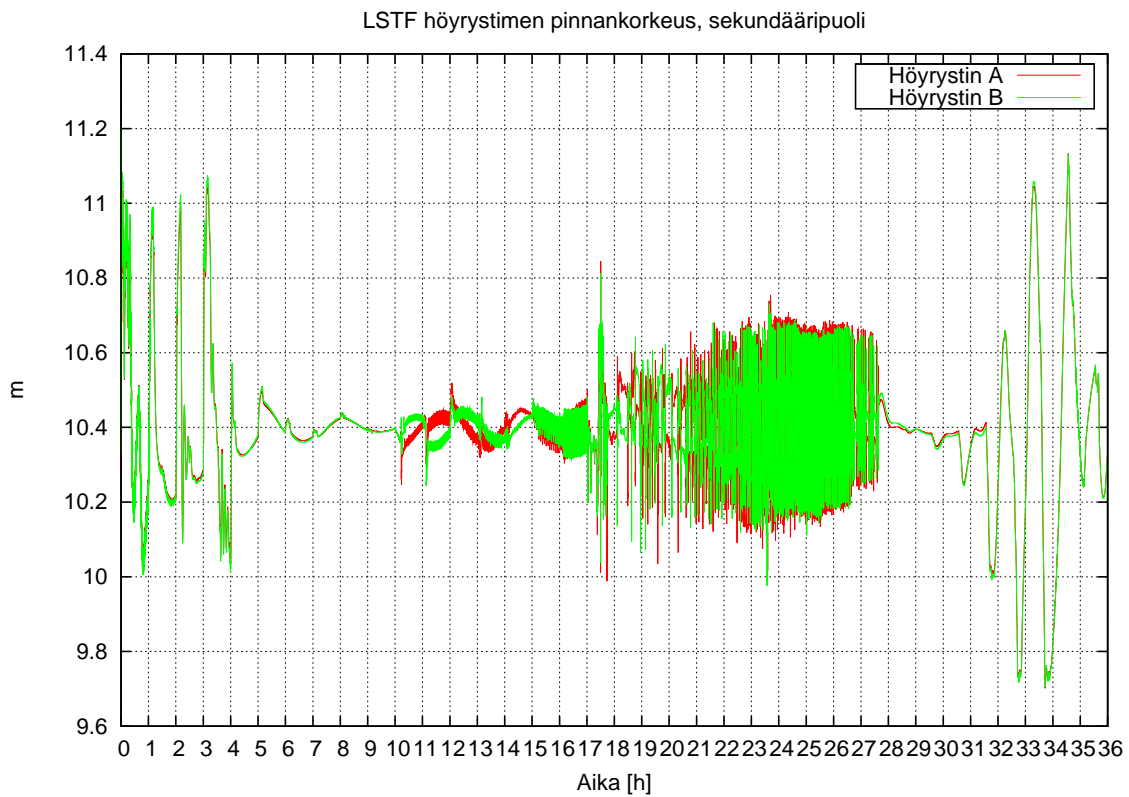
Kuva L2-13. LSTF booripitoisuuksia primääripiirissä.



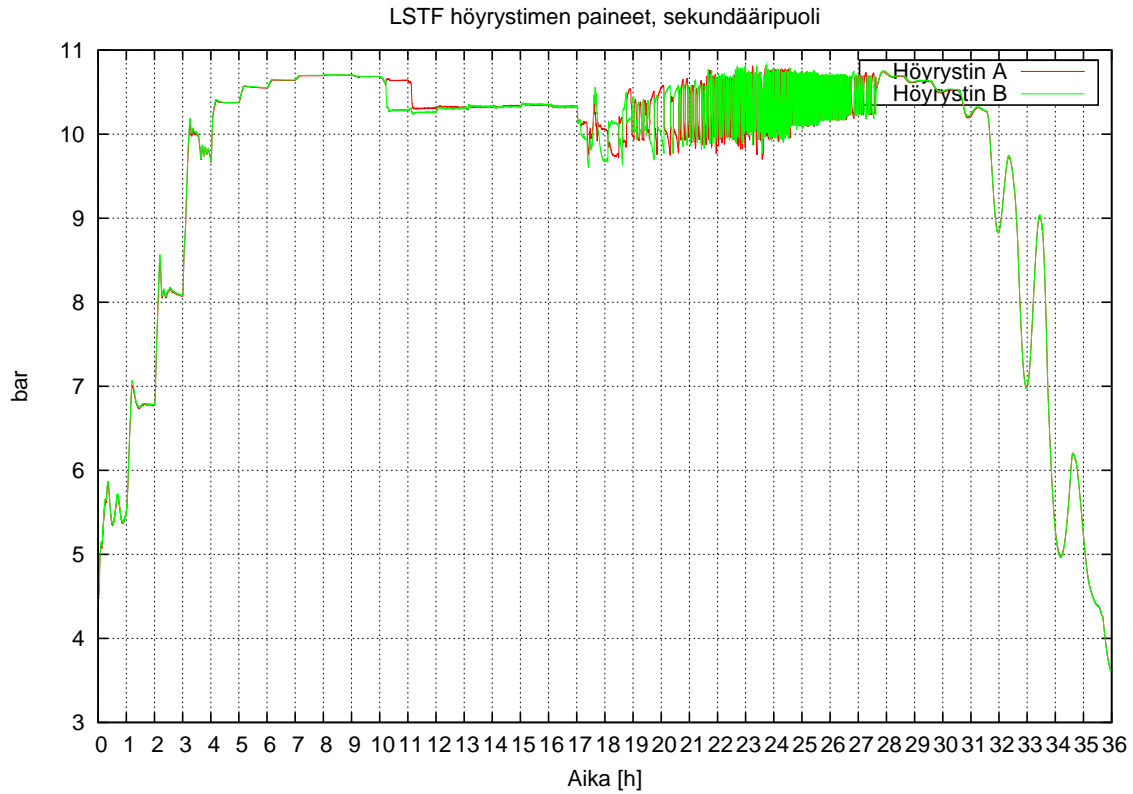
Kuva L2-14. LSTF sydämen sisäänmenonoodin lämpötilä.



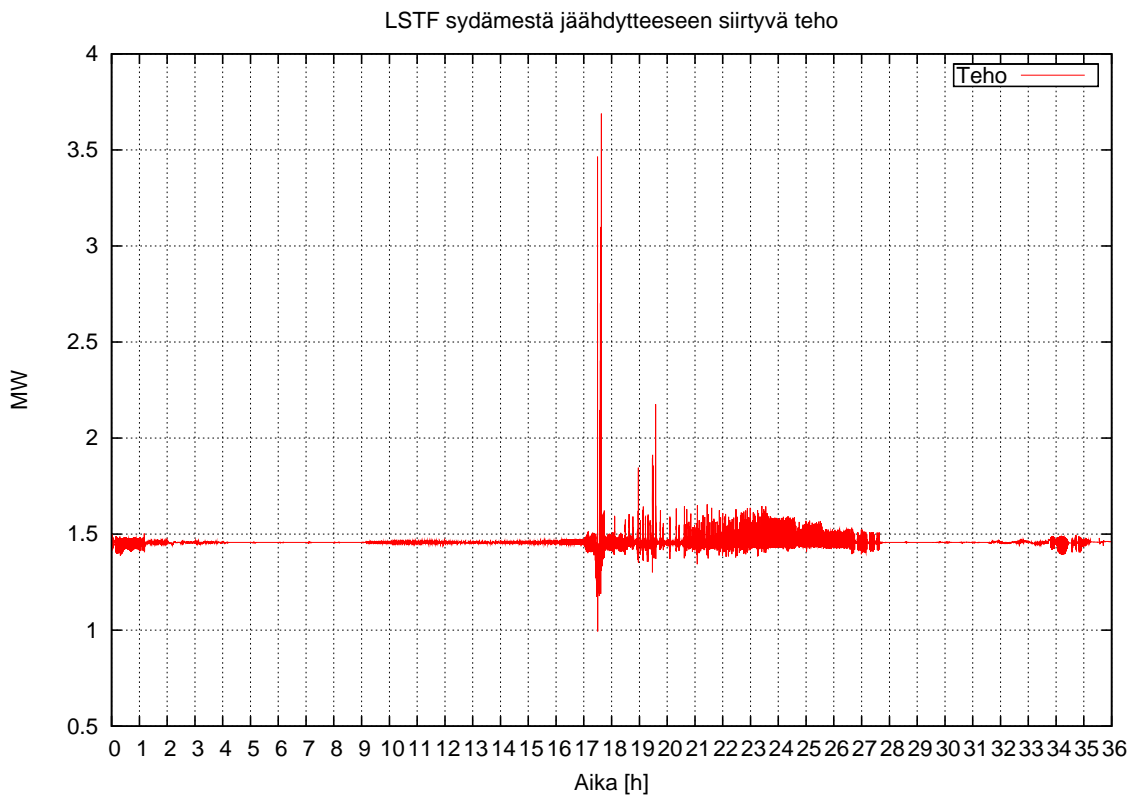
Kuva L2-15. LSTF syöttöveden massavirta höyrystimiin.



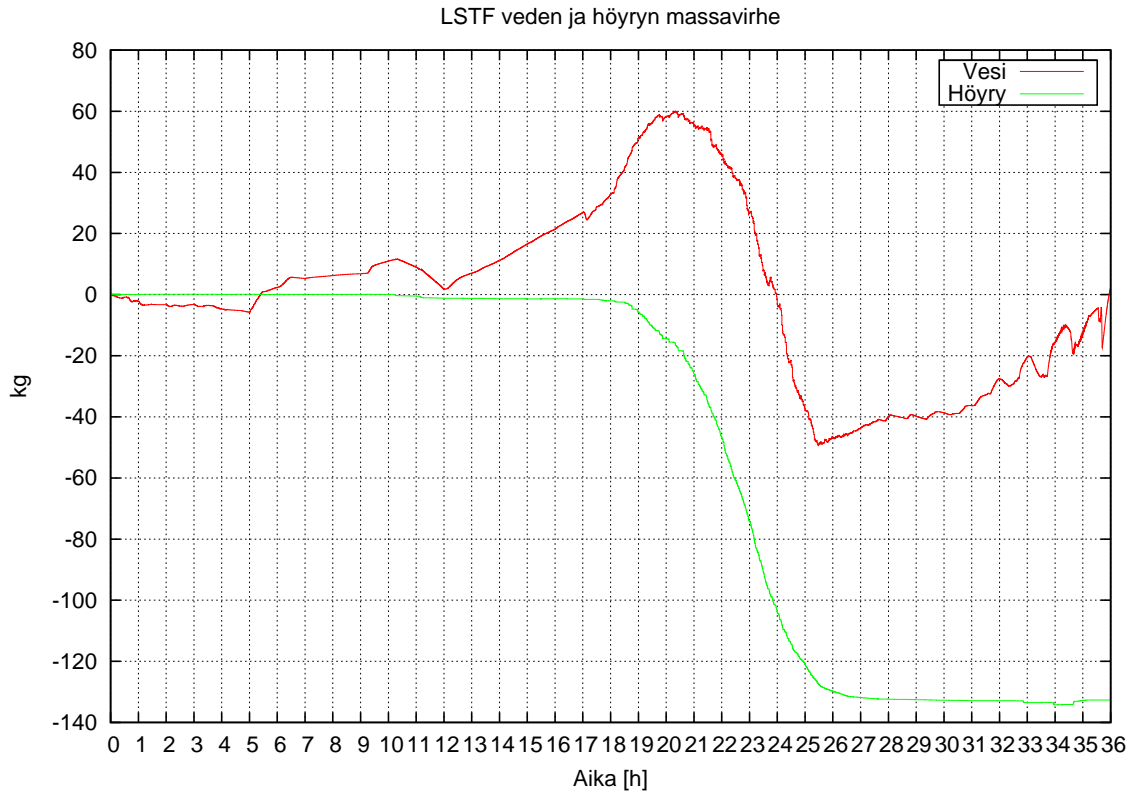
Kuva L2-16. LSTF höyrystimien sekundääripuolen pinnankorkeuksia.



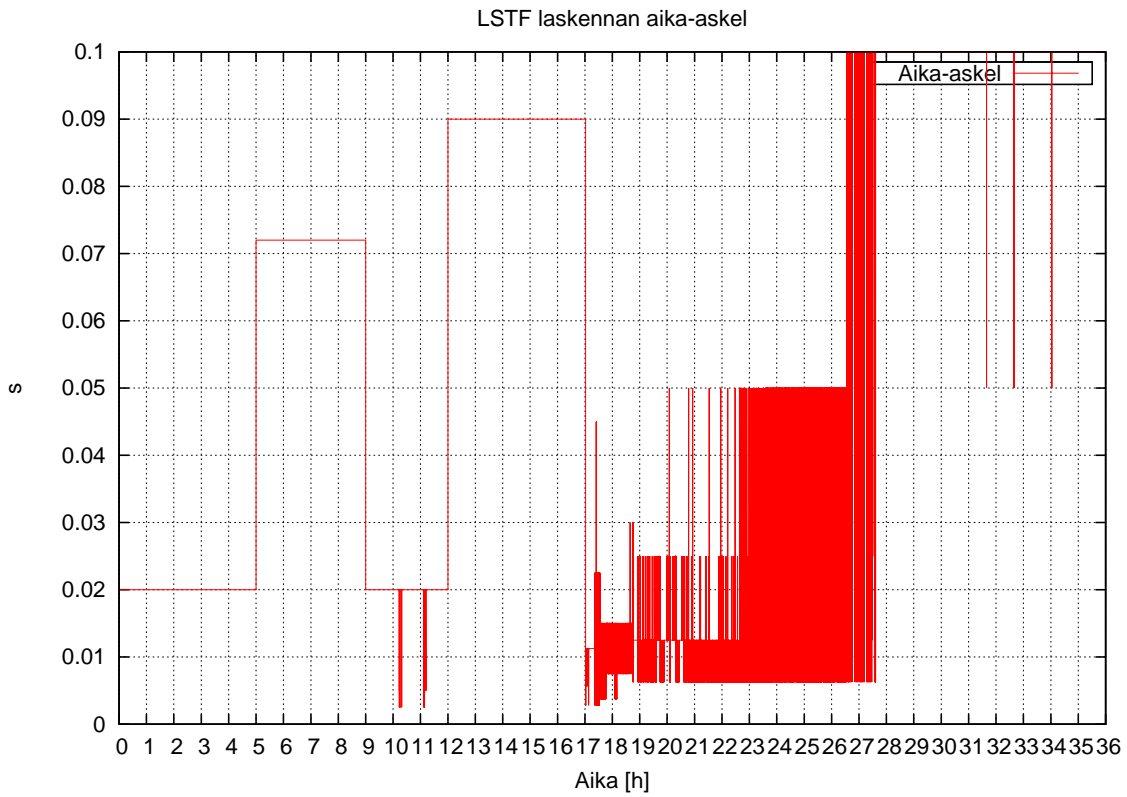
Kuva L2-17. LSTF höyrystimien paineita sekundääripuolelta.



Kuva L2-18. LSTF sydäimestä jäähdytteeseen siirtyvä teho.

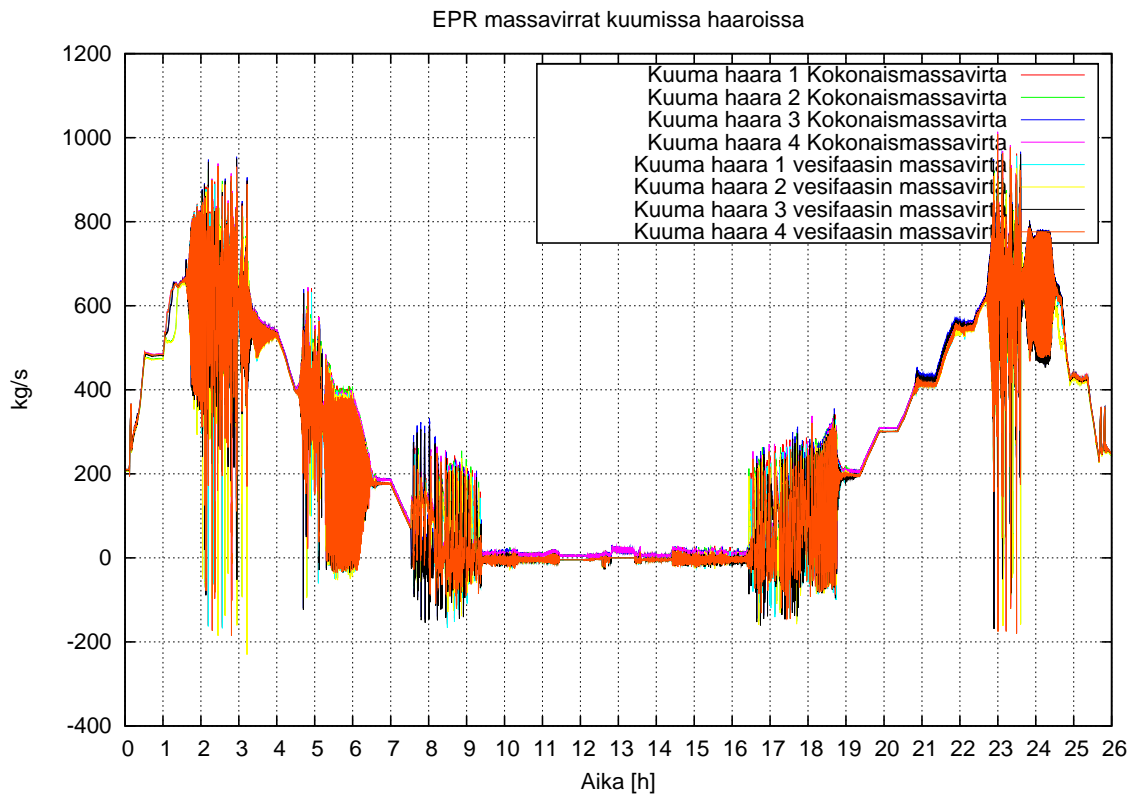


Kuva L2-19. LSTF veden ja höyryn massavirhe.

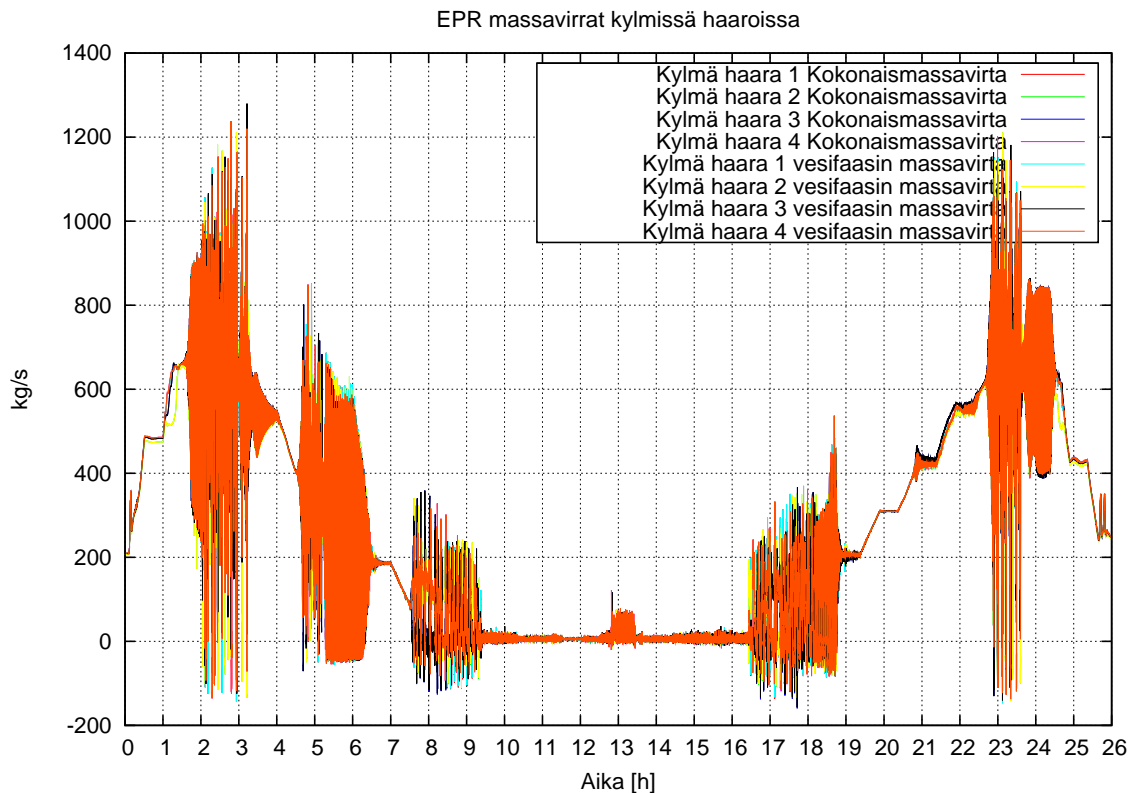


Kuva L2-20. LSTF laskennan aika-askel.

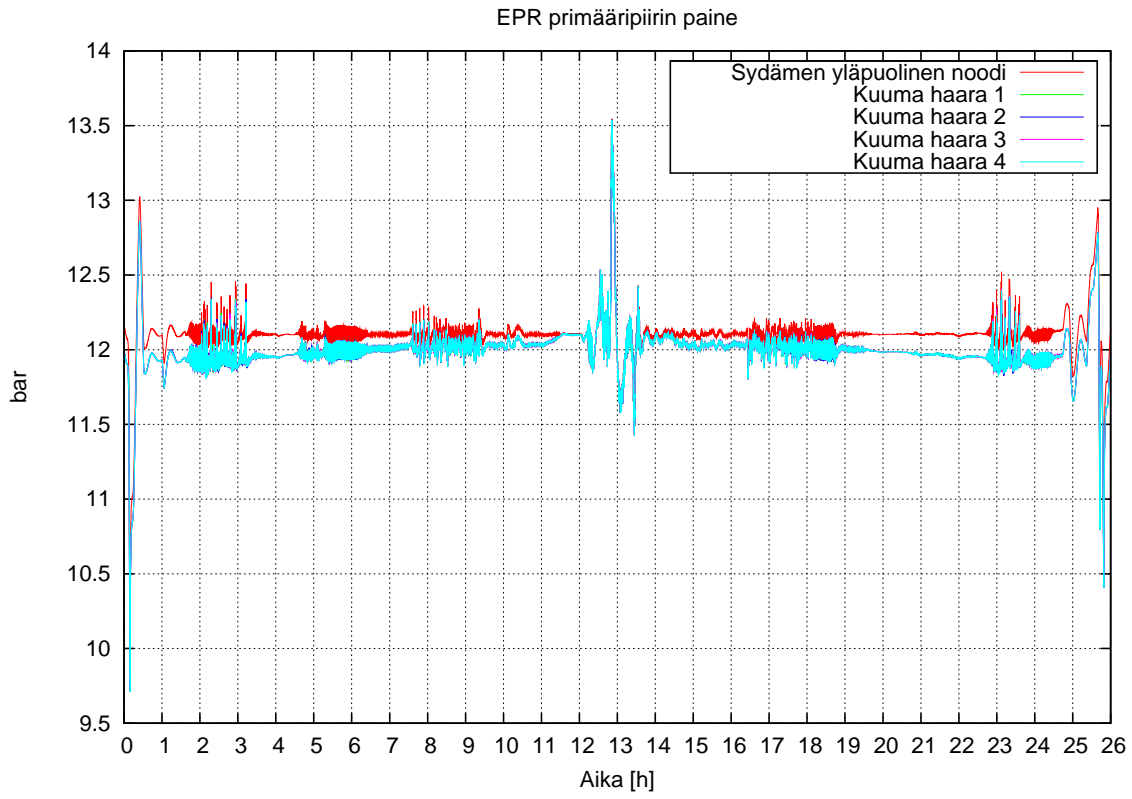
LIITE 3 Kuvat EPR-laskennasta



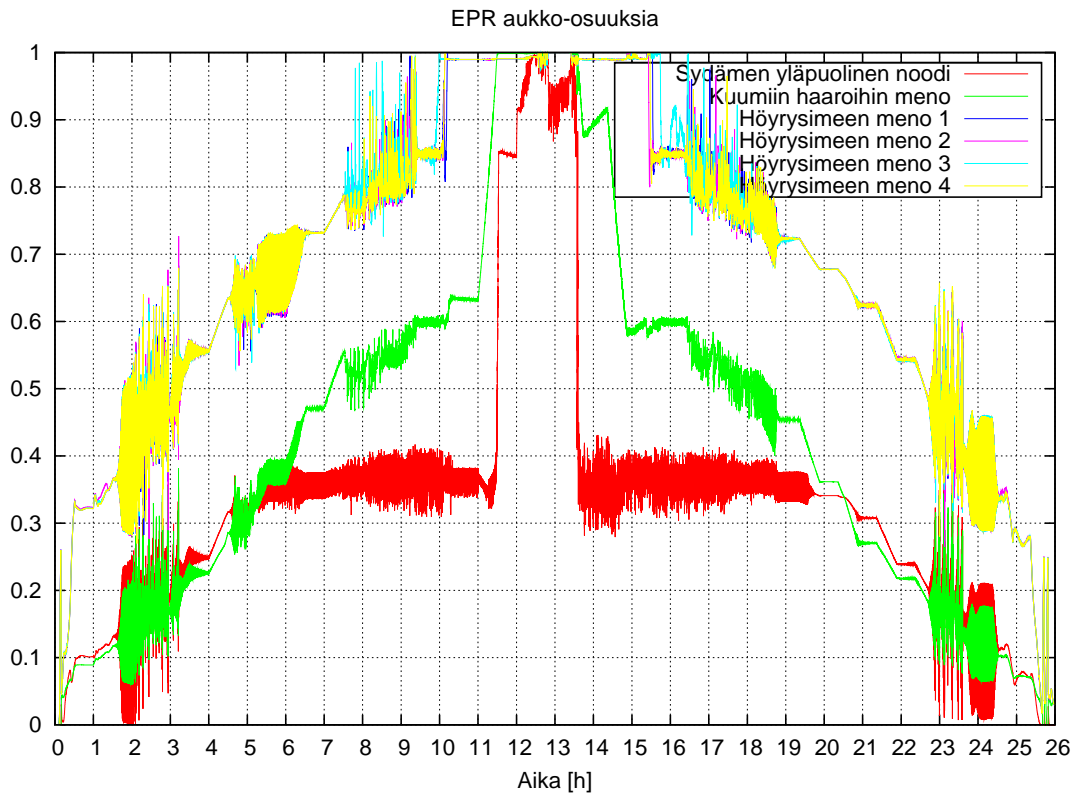
Kuva L3-1. EPR massavirrat kuumissa haaroissa.



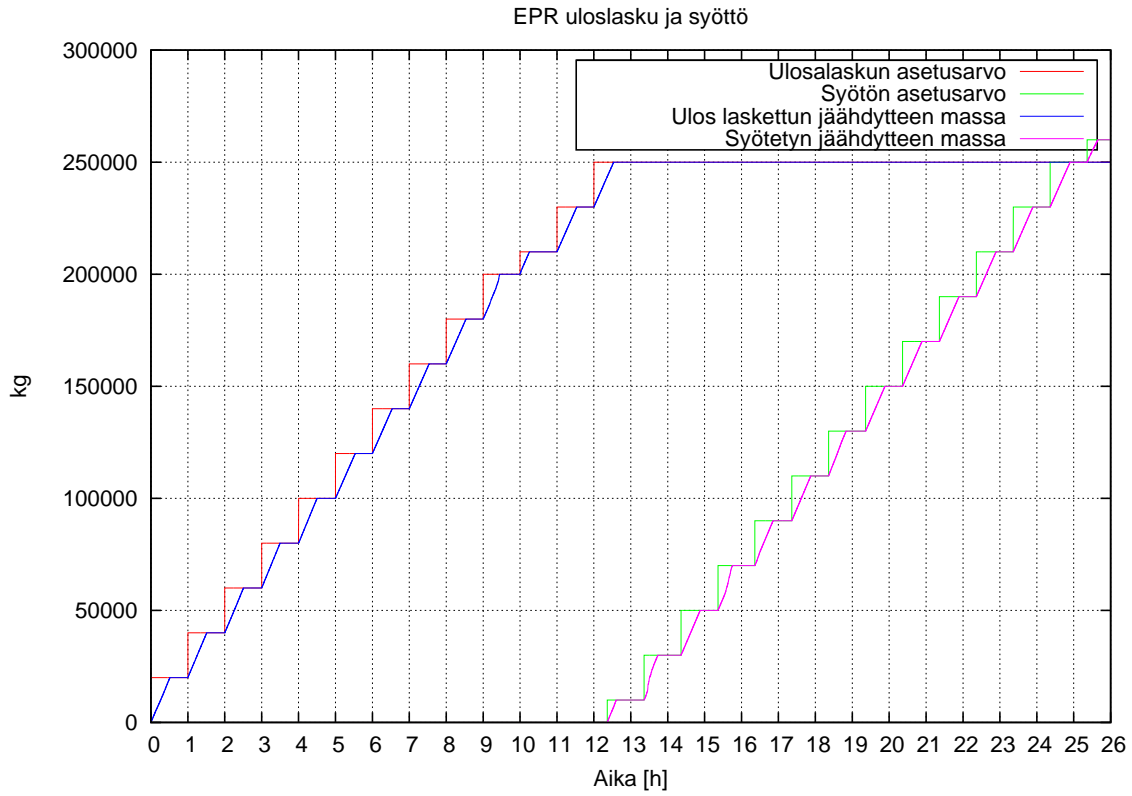
Kuva L3-2. EPR massavirrat kylmissä haaroissa.



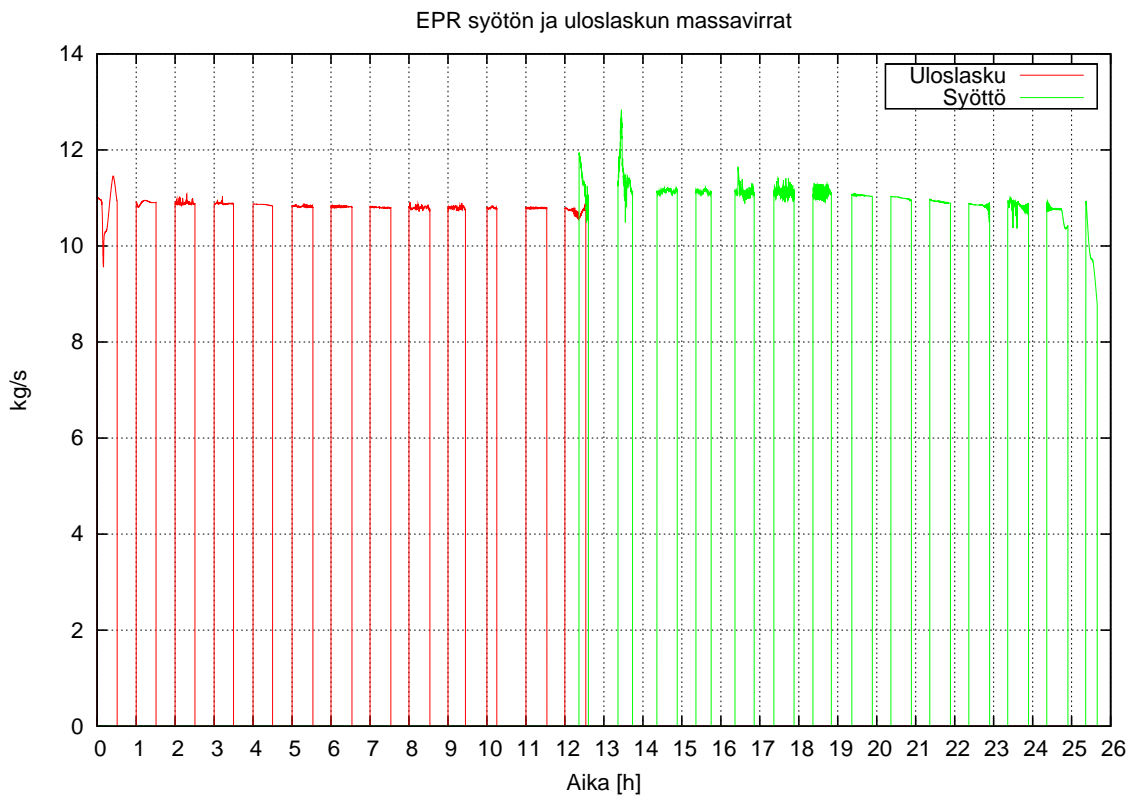
Kuva L3-3. EPR primääripiirin paineita.



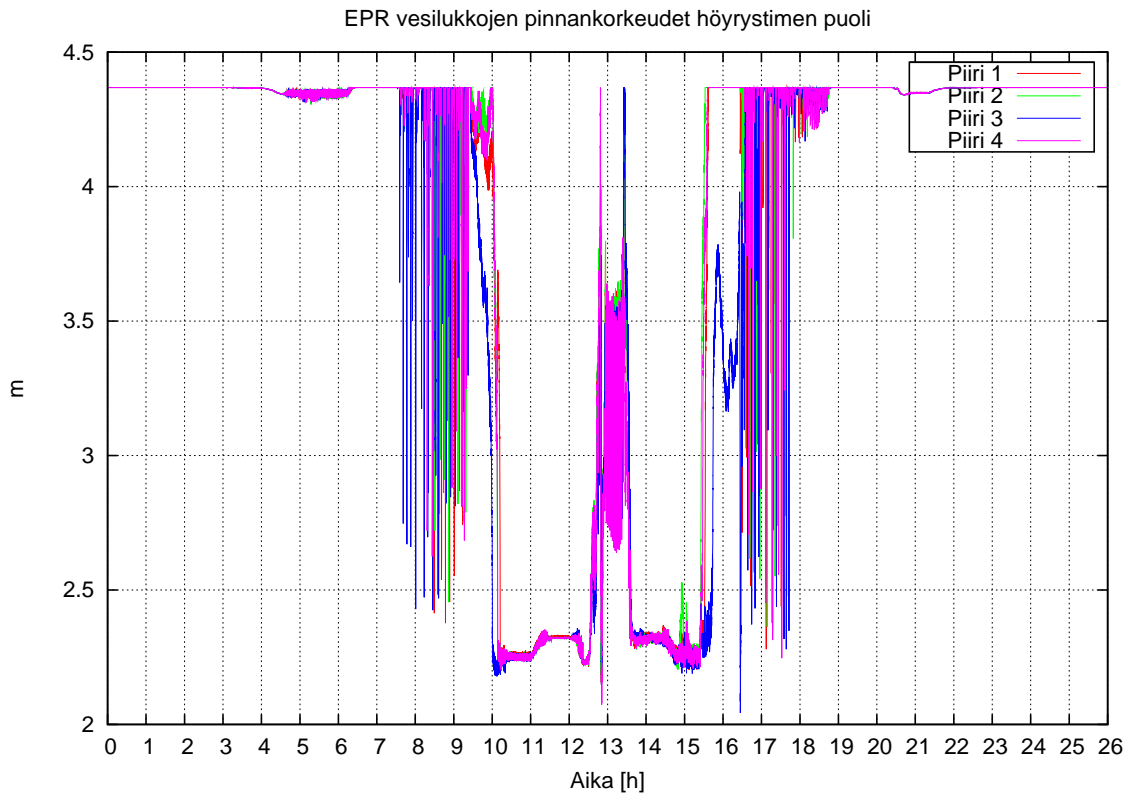
Kuva L3-4. EPR aukko-osuuksia.



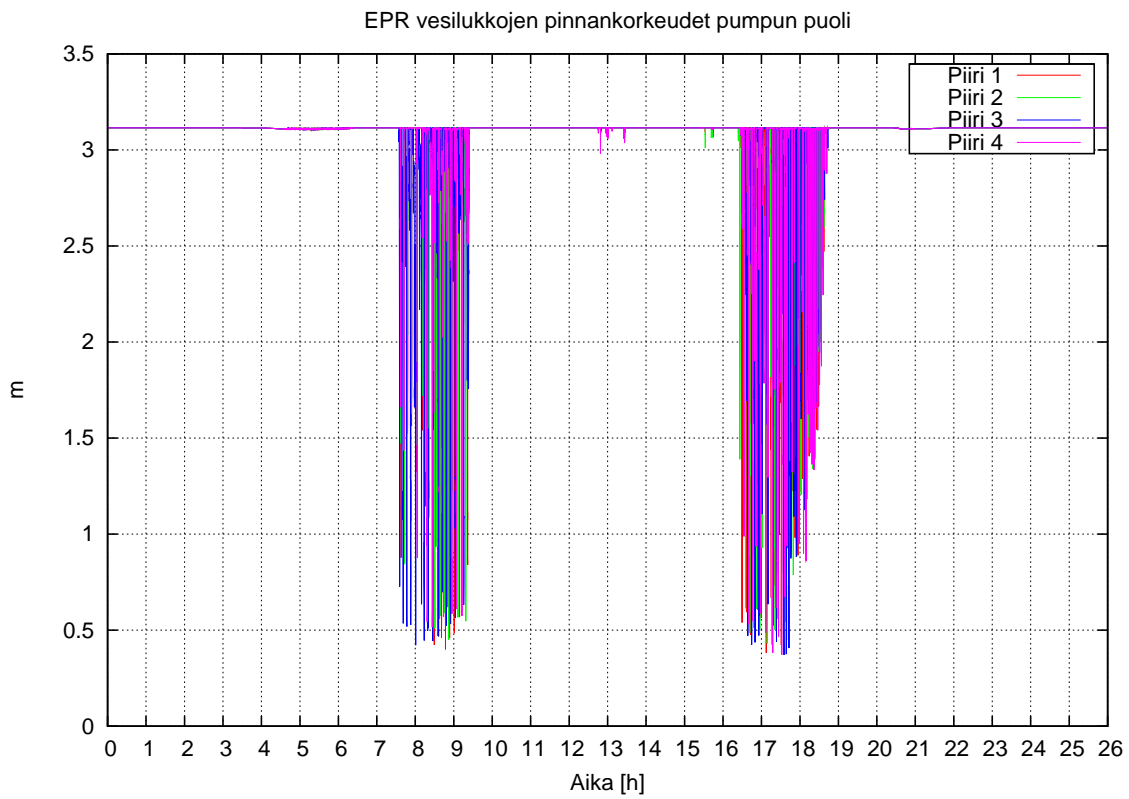
Kuva L3-5. EPR uloslasku ja syöttö.



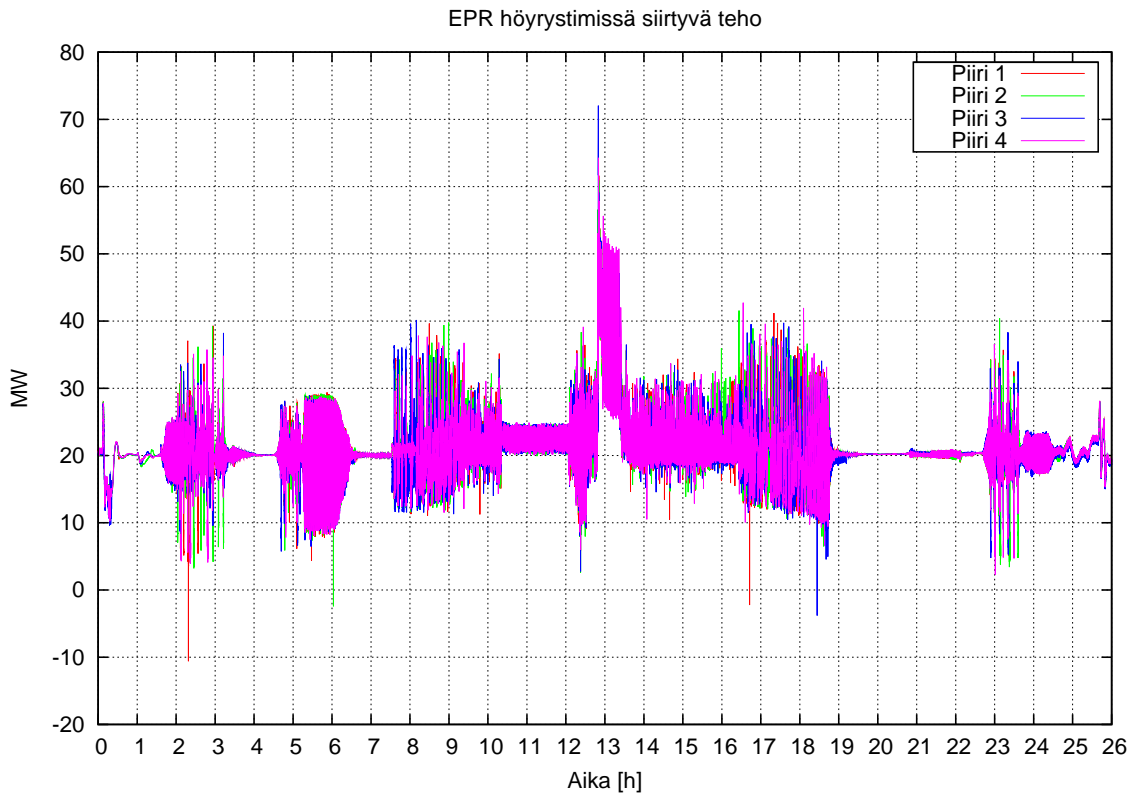
Kuva L3-6. EPR uloslaskun ja syötön massavirrat.



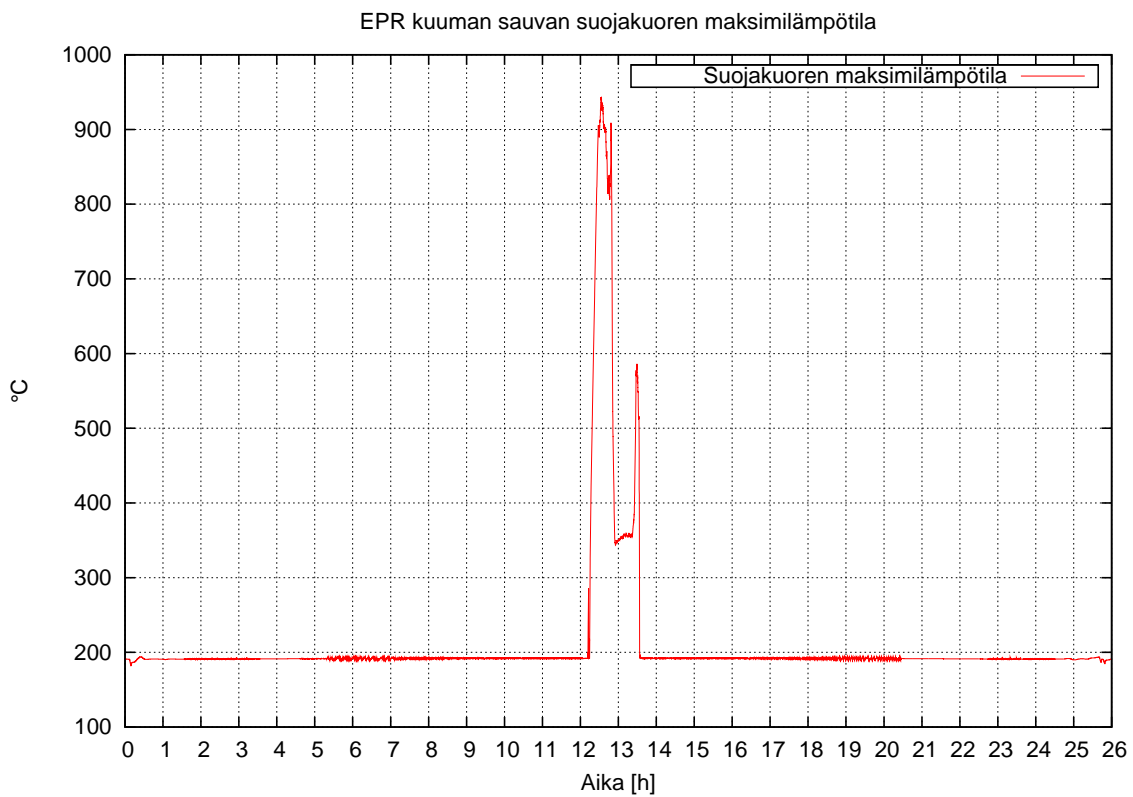
Kuva L3-7. EPR vesilukkojen pinnankorkeuksia höyrystimen puolelta.



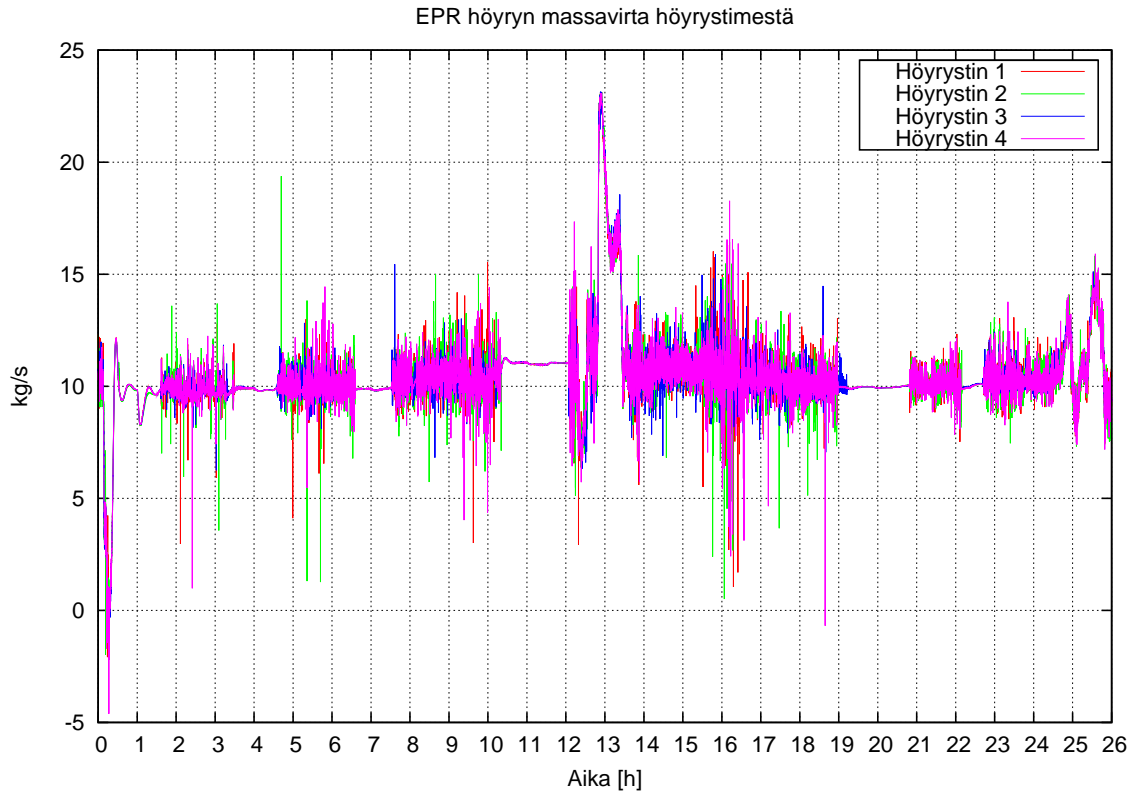
Kuva L3-8. EPR vesilukkojen pinnankorkeuksia pumpun puolelta.



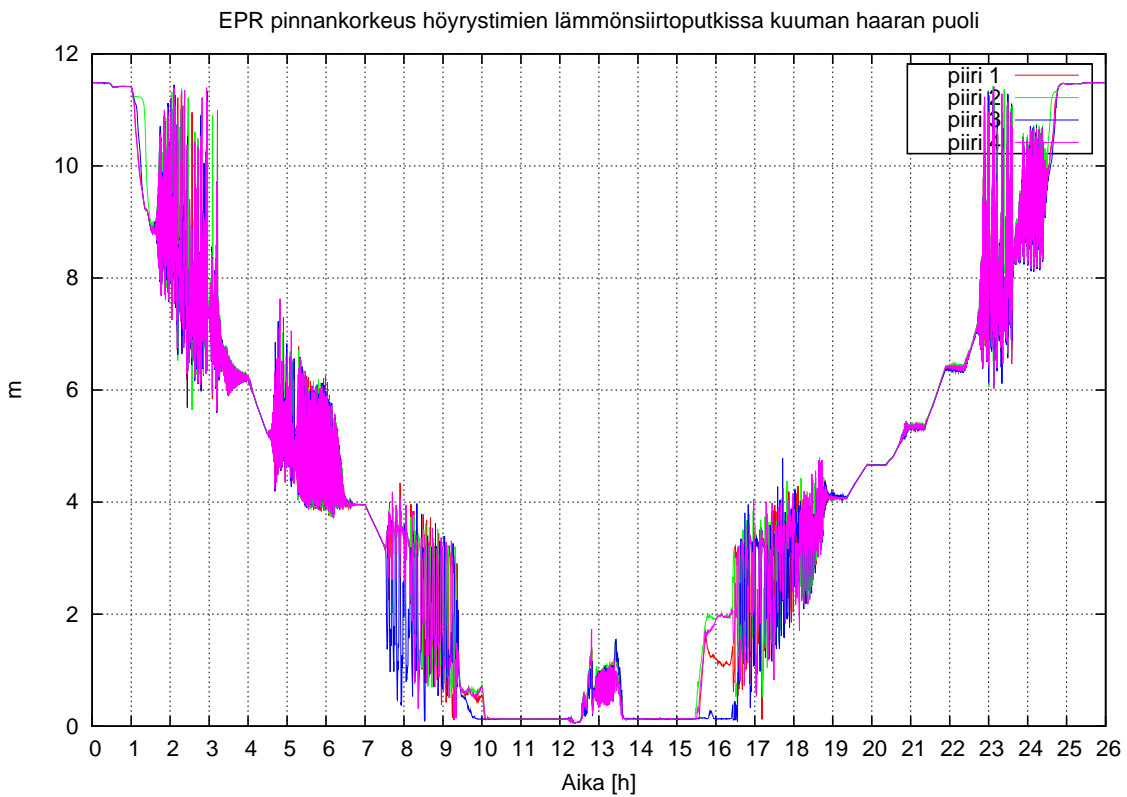
Kuva L3-9. EPR höyrystimissä siirtyvä teho.



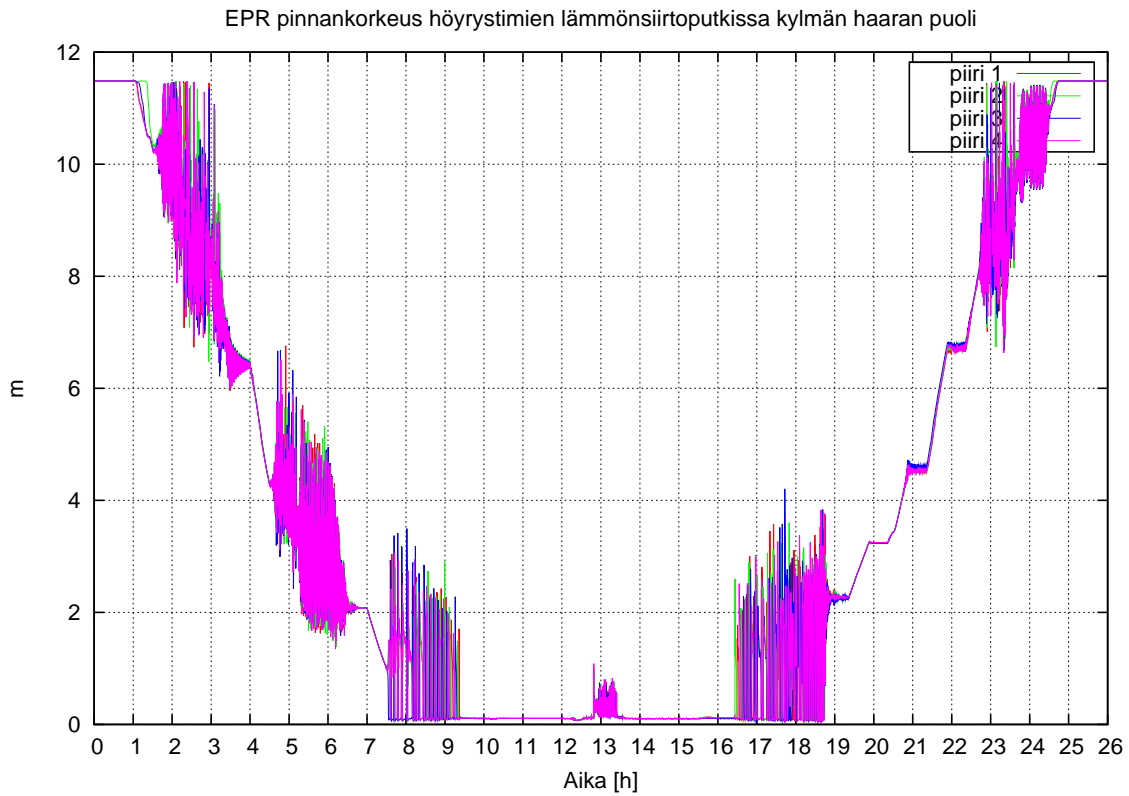
Kuva L3-10. EPR suojakuoren maksimilämpötila.



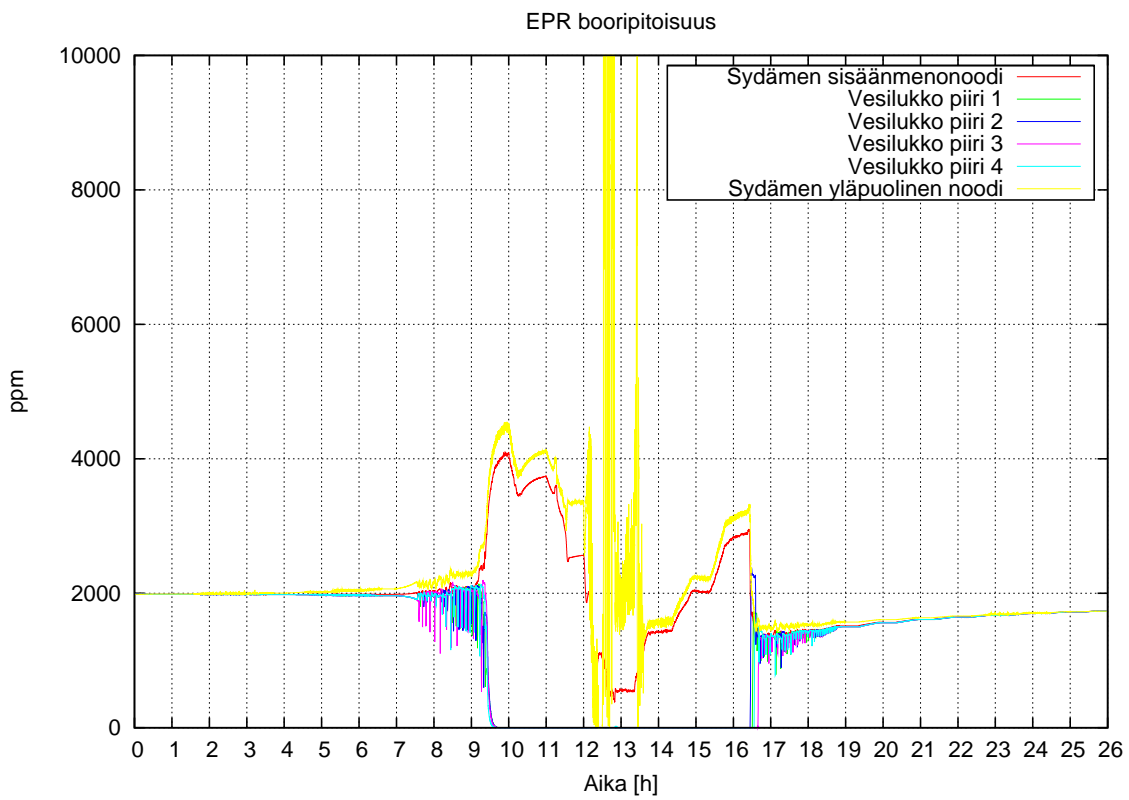
Kuva L3-11. EPR höyryn massavirta höyrystimestä.



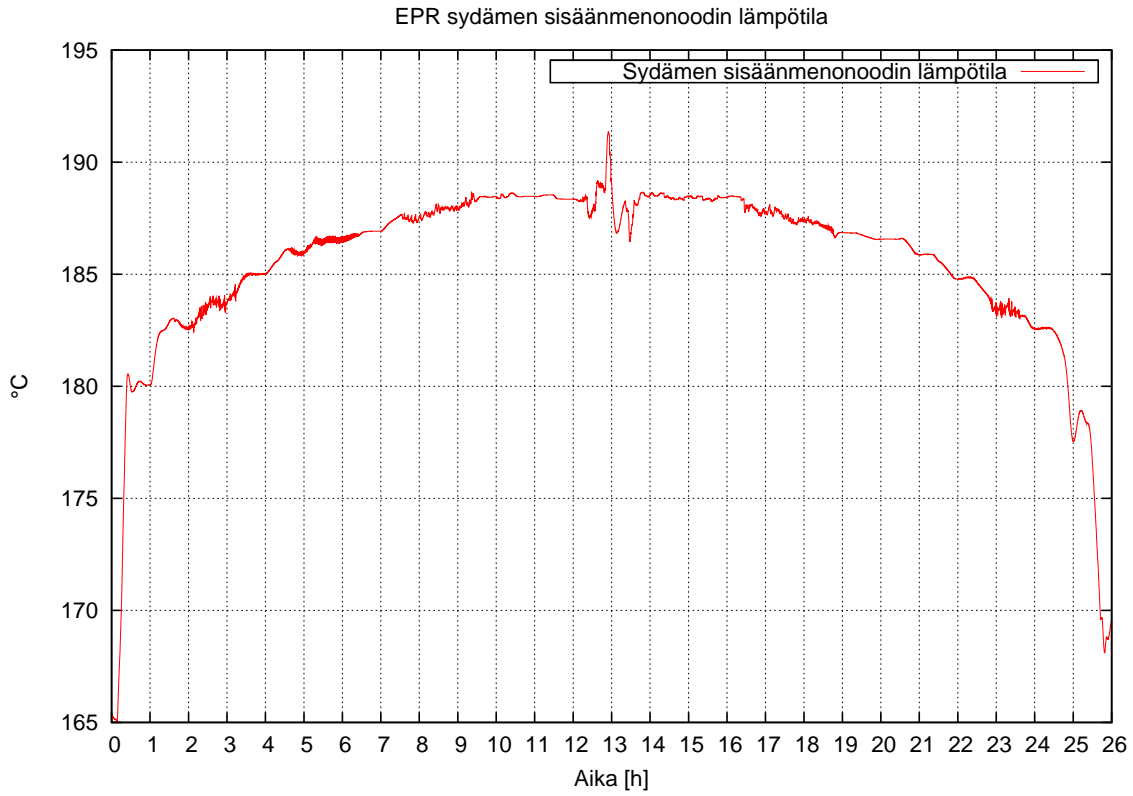
Kuva L3-12. EPR höyrystimien lämmönsiirtoputkien pinnankorkeuksia kuuman haaran puolelta.



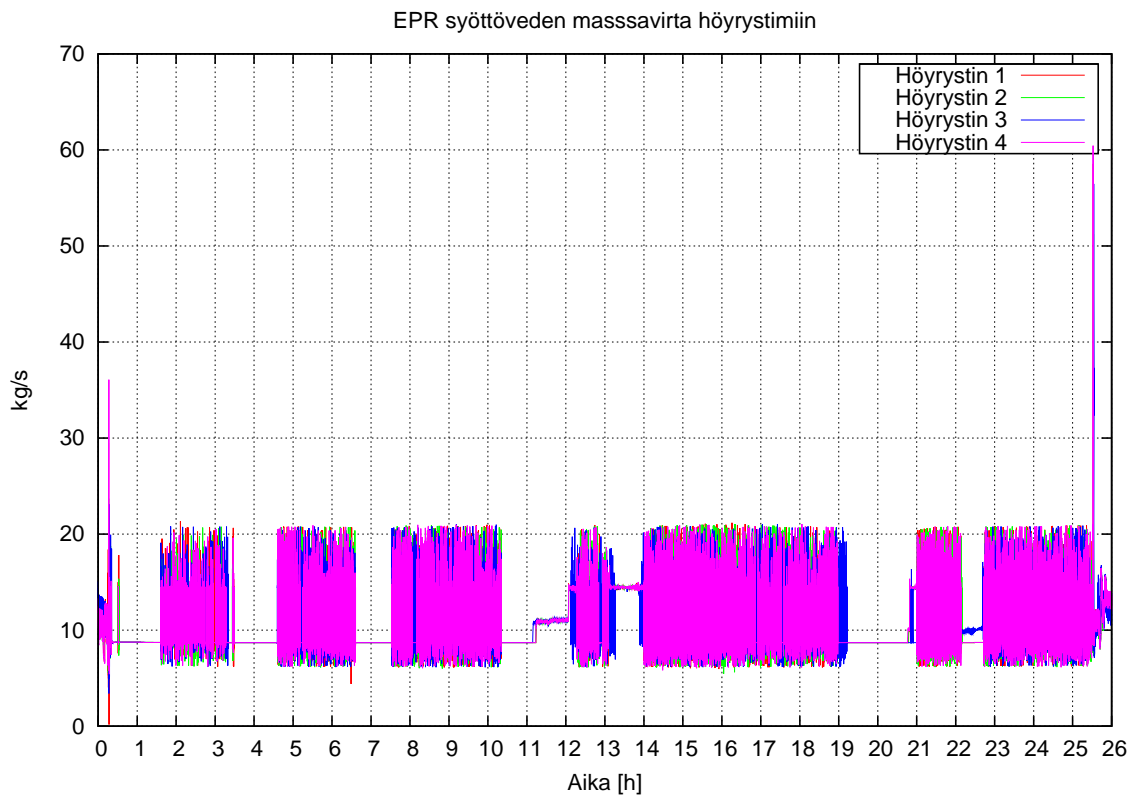
Kuva L3-13. EPR höyrystimien lämmönsiirtoputkien pinnankorkeuksia kylmän haaran puolelta.



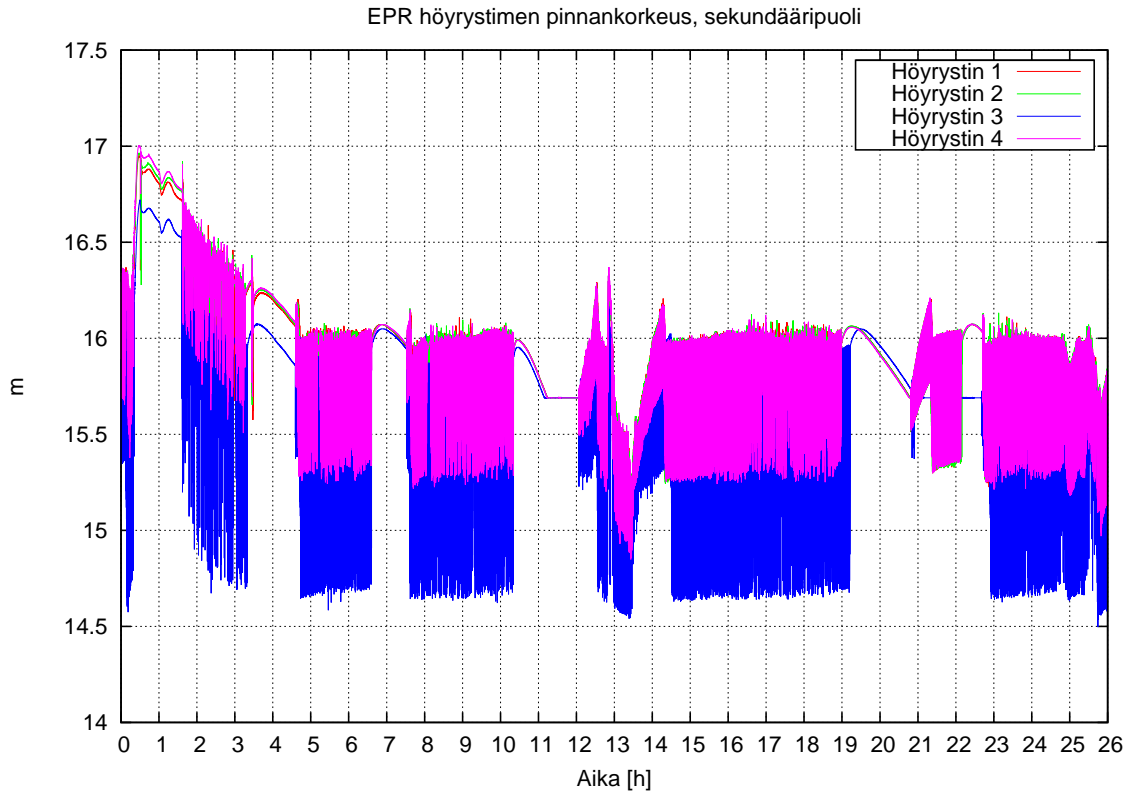
Kuva L3-14. EPR booripitoisuuksia primääripiirissä.



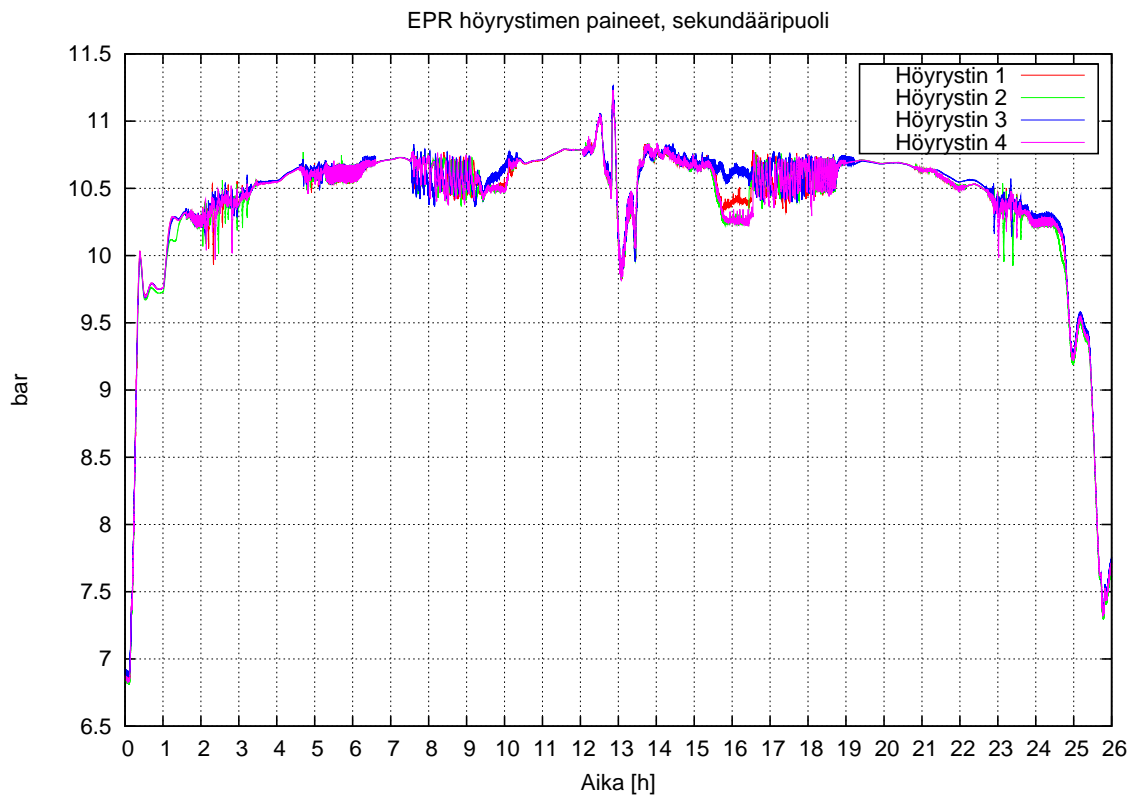
Kuva L3-15. EPR sydämen sisäänmenonoodin lämpötila.



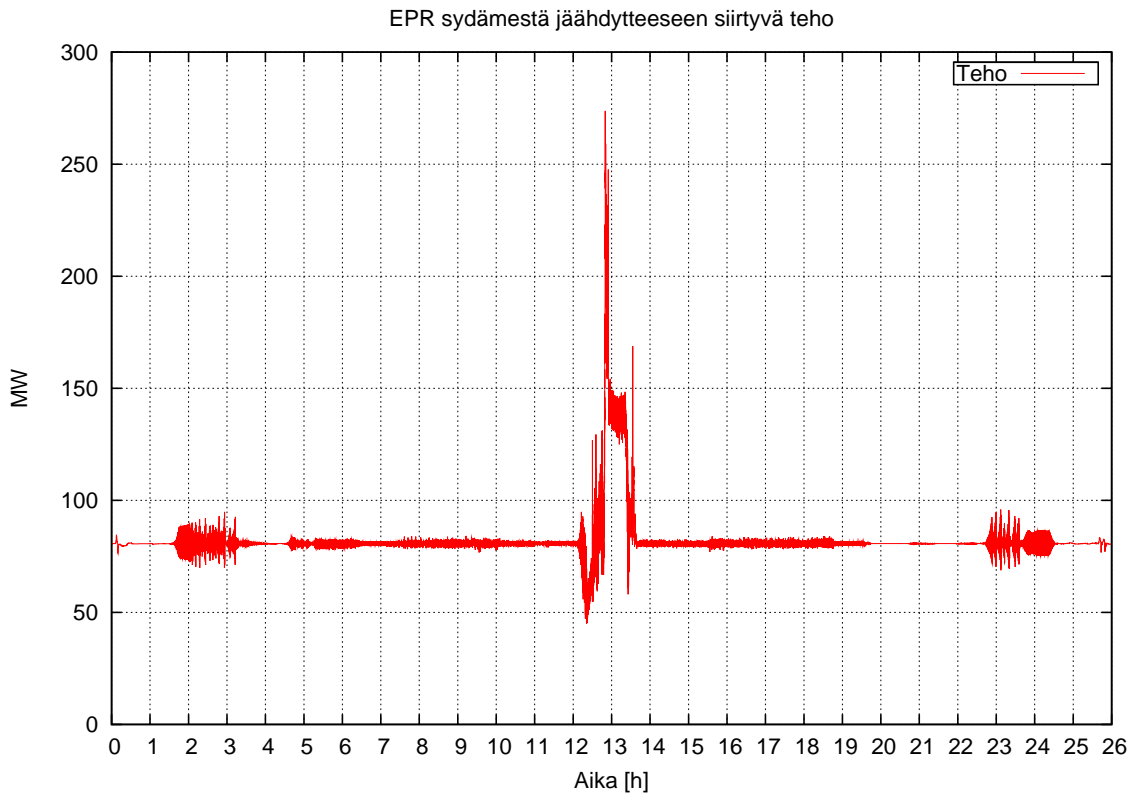
Kuva L3-16. EPR syöttöveden massavirta höyrytimiin.



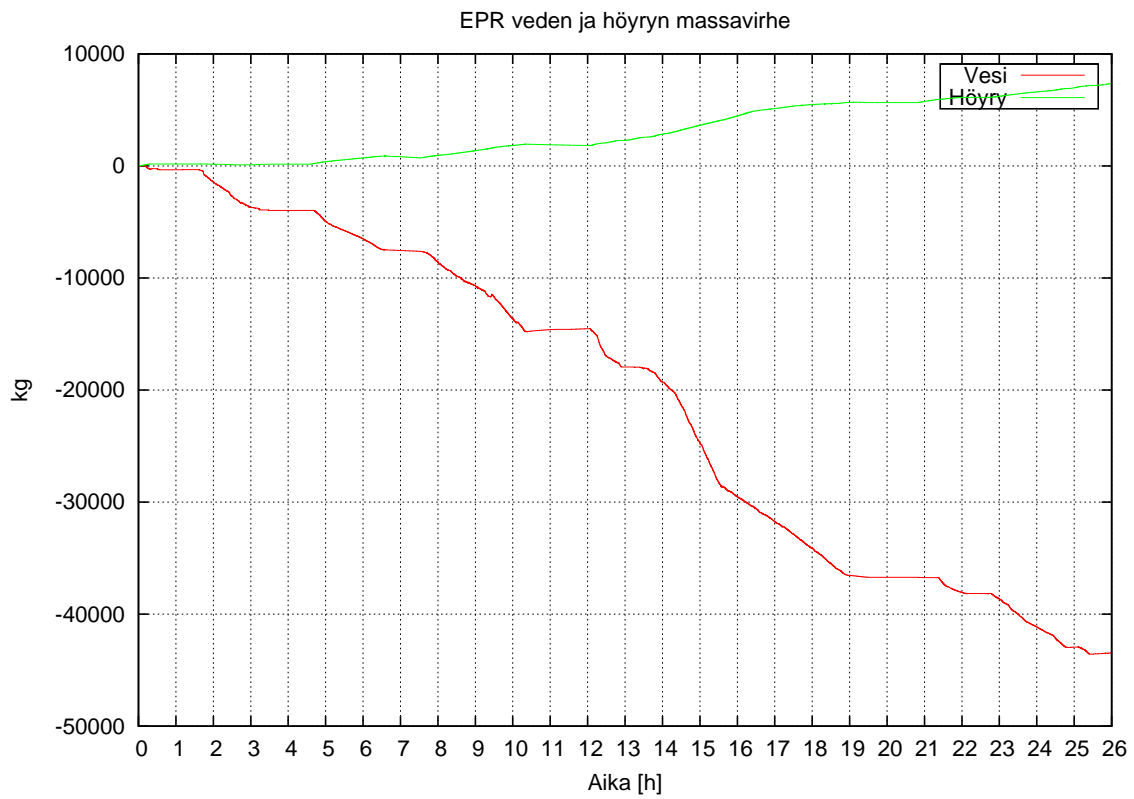
Kuva L3-17. EPR höyrystimien sekundääripuolen pinnankorkeuksia.



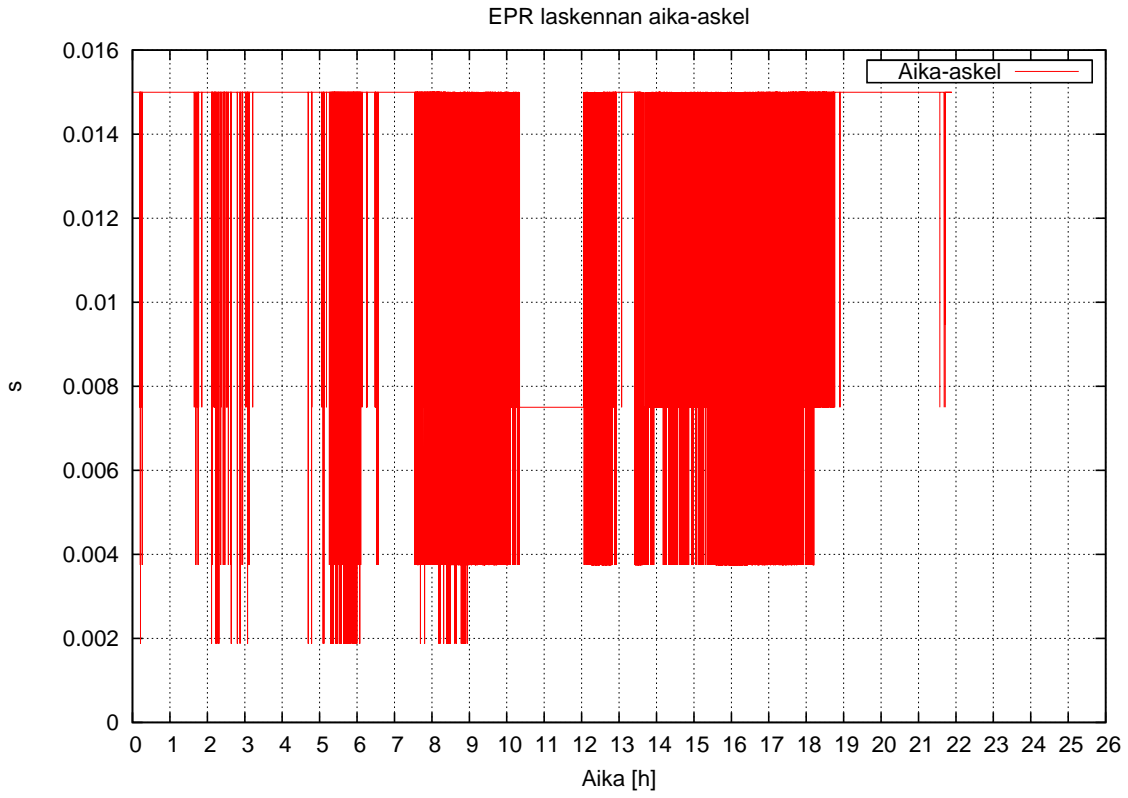
Kuva L3-18. EPR höyrystimien paineita sekundääripuolelta.



Kuva L3-19. EPR sydäimestä jäähdytteeseen siirtyvä teho.



Kuva L3-20. EPR veden ja höyryn massavirhe.



Kuva L3-21. EPR laskennan aika-askel.