LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Mikko Heinonen

VUOSIHUOLLON AIKAINEN KÄYTTÖTURVALLISUUS

Työn tarkastajat: Professori, TkT Riitta Kyrki-Rajamäki
DI Jukka Kupila

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Mikko Heinonen

Vuosihuollon aikainen käyttöturvallisuus

Diplomityö

2013

116 sivua, 8 kuvaa ja 15 taulukkoa

Tarkastajat: Professori, TkT Riitta Kyrki-Rajamäki
DI Jukka Kupila

Hakusanat: ydinvoimalaitos, vuosihuolto, seisokki, PRA, käyttöturvallisuus, häiriöohje, hätätilanneohje

Tässä työssä on tarkasteltu Suomessa käytössä olevien ydinvoimalaitosten vuosihuoltojen aikaista käyttöturvallisuutta yleisesti sekä arvioitu voimayhtiöiden vuosihuoltojen aikaisten häiriö- ja hätätilanteiden varalta laatimien ohjeiden kattavuutta.

Kattavuuden arviointi suoritettiin tarkastelemalla seisokkitiloja käsitteleviä todennäköisyysperusteista riskianalyysia (PRA), lopullista turvallisuusselostetta (FSAR) ja turvallisuusteknisiä käyttöehtoja (TTKE). PRA:n mukaan Olkiluodon 1 ja 2 laitosyksiköiden sydänvauriotaajuudesta noin 25 % liittyy vuosihuollon aikaisiin alkutapahtumiin. Loviisan laitosyksiköillä vastaava osuus on noin 61 %. Merkittävimmät vuosihuoltojen aikaiset alkutapahtumat sydänvaurioriskin kannalta olivat Olkiluodossa tulipalot, jäähdytteen menetykset ja jälkilämmön poiston menetykset sekä Loviisassa raskaan taakan pudotukset, booripitoisuuden laimeneminen ja öljyonnettomuudet.

Saatujen tulosten perusteella voitiin todeta, että voimayhtiöiden laatimat häiriö- ja hätätilanneohjeet olivat pääosiltaan asianmukaiset ja ne kattoivat hyvin erilaiset seisokin aikaiset alkutapahtumat. Tarkastelun perusteella tehtiin ohjeistoon muutamia parannusehdotuksia. Seisokkitiloja koskevat TTKE ja FSAR havaittiin asianmukaisiksi molemmilla tarkastelluilla laitoksilla.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Energy Technology

Mikko Heinonen

Operational safety during outage

Master's thesis

2013

116 pages, 8 figures and 15 charts

Examiners: Professor, D.Sc (Tech.) Riitta Kyrki-Rajamäki
M.Sc. (Tech) Jukka Kupila

Keywords: nuclear power plant, outage, shutdown state, PRA, operational safety, emergency operating procedures

This master's thesis examines operating safety during annual outages in existing nuclear power plants in Finland and assesses the coverage of the emergency operating procedures made by the nuclear power companies.

The assessment was made by comparing the emergency operating procedures with shutdown state probabilistic risk assessments (PRA), final safety analysis review (FSAR) and technical specifications (Tech Specs). According to the PRA, 25 % of the core damage frequency in Olkiluoto 1 and 2 is related to outage. In the Loviisa plants the share is 61 %. The most significant initial events in the Olkiluoto plants are fire, loss of coolant and loss of residual heat removal. Respectively, in the Loviisa plants, the most significant initial events are heavy load drops, boron dilution transient and oil accidents.

According to the results, it was concluded that the emergency operating procedures were generally in adequate form and they cover well different initial events during outage. Only minor proposals for improvement were made. Outage related FSAR and Tech Specs were also found adequate for the both reviewed power plants.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty STUKin Ydinvoimalaitosten valvontaosaston Käyttöturvallisuustoimistossa Helsingin Roihupellossa. Haluan osoittaa kiitokset seuraaville työssäni ja opinnoissani eri tavoin mukana olleille tahoille.

Haluan ensimmäiseksi kiittää STUKia mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta. STUKilta erityiset kiitokset haluan osoittaa työni ohjaajalle Jukka Kupilalle, joka opasti minua erinomaisesti työssäni. Erityiskiitos myös Riskinalyysit-toimistolle, jonka kanssa pääsin osallistumaan käytännön vuosihuoltovalvontaan Olkiluodossa ja Loviisassa. Haluan lisäksi kiittää tasapuolisesti kaikkia STUKin työtovereitani kaikesta avusta ja kannustuksesta työni tekemisen aikana.

Professori Riitta Kyrki-Rajamäkeä haluan kiittää diplomityöni tarkastuksesta sekä opastuksesta työni aikana. Haluan lisäksi kiittää koko Lappeenrannan teknillistä yliopistoa saamastani laadukkaasta opetuksesta opintojeni aikana.

Opiskeluvuodet Lappeenrannassa menivät nopeasti. Opiskelijan elämä on osaltani pian ohi, mutta tuona aikana koetut muistot säilyvät aina mielessäni. Suuri kiitos ystävilleni, joiden kanssa sain viettää nämä vuodet. Kiitos GM:n ysäripuolelle ja Viipurinportin ABC:lle niistä kaikista hetkistä, jotka auttoivat minua jaksamaan välillä raskaidenkin aikojen läpi kunnialla.

Lopuksi haluan kiittää vanhempiani saamastani tuesta ja kannustuksesta opintojeni aikana.

Helsingissä 11.1.2013

Mikko Heinonen

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNELUETTELO **4**

1 JOHDANTO **7**
1.1 Työn tausta ... 7
1.2 Työn tavoitteet ja rajaus ... 8
1.3 Työn rakenne ... 8

2 YDINVOIMAN KÄYTÖN TURVALLISUUS **10**
2.1 Yleiset turvallisuusperiaatteet ... 10
2.1.1 Rinnakkaisperiaate ... 10
2.1.2 Erilaisuusperiaate ... 11
2.1.3 Erotteluperiaate ... 11
2.1.4 Turvallisen tilan periaate ... 11
2.1.5 Syvyyssuuntaisen puolustuksen periaate ... 11
2.2 Turvallisuuden arviointi ... 12
2.2.1 Deterministinen turvallisuusanalyysi ... 13
2.2.2 Todennäköisyysperusteinen riskianalyysi ... 13

3 YDINVOIMALAITOSTEN VUOSIHUOLTOSEISOKIT **15**
3.1 Vuosihuoltojen kesto ja ajankohta ... 15
3.2 Vuosihuollon aikana tehtävät työt ... 16
3.3 Vuosihuollon vaiheet ... 17
3.4 Vuosihuoltojen suunnittelu ... 18
3.5 Vuosihuollon aikainen turvallisuus ... 18

4 VUOSIHUOLTOJA KOSKEVAT OHJEET JA STANDARDIT **20**
4.1 Säteilyturvakeskus ... 20
4.2 Turvallisuustekniset käyttöehdot ... 21
4.3 Lopullinen turvallisuusseloste ... 22
4.4 Häiriö- ja hätätilanneohjeet ... 23
4.5 IAEA:n standardit ja ohjeet ... 24

5 OLKILUODON YDINVOIMALAITOS: YKSIKÖT 1 JA 2 **26**
5.1 Yleistä tietoa laitoksista ... 26
5.2 Turvallisuus ... 28
5.3 Vuosihuollot ... 31
5.3.1 Vuosihuollon käyttötilat ... 31
5.3.2 Alasajo kylmään seisokkiin ... 32
5.3.3 Jälkilämmön poisto seisokin aikana ... 32
5.3.4 Järjestelmien erotukset ... 33
5.3.5 Polttoaineen vaihto ... 33
5.3.6 Ylösajo ... 34
5.4 Seisokkitilojen PRA ... 35
5.4.1 Tulipalot ... 37
5.4.2 Vuodot ... 38
5.4.3 Jälkilämmönpoiston menetykset ... 39

5.4.4 Kylmänä paineistuminen ... 40
5.4.5 Paikallinen kriittisyys ... 40
5.4.6 Raskaat nostot ... 41
5.5 Seisokkitilojen FSAR-analyysit ... 41
5.5.1 Jäähdytteen vuoto pääkiertopumpun yhteestä ... 42
5.5.2 Jälkilämmön poiston menetys ... 43
5.5.3 Järjestelmän 721 menetys polttoaineenvaihdon aikana ... 44
5.5.4 Säätösauvan putoaminen ... 45
5.5.5 Jäähdytysvesikanavan tukkeuma ... 46
5.6 Seisokkitilojen TTKE ... 46
5.6.1 Reaktiivisuuden säätö ... 47
5.6.2 Sydämen jäähdytys ... 47
5.6.3 Lauhdutusallas ... 48
5.6.4 Jälkilämmön poisto ... 48
5.6.5 Sähkövoiman syöttö ... 49
5.6.6 Sydänmuutokset ... 50
5.6.7 Raskaat nostot ja kuljetukset reaktorirakennuksessa ... 50
5.6.8 Palosuojelu ... 51
5.7 Häiriö- ja hätätilanneohjeet ... 51
5.7.1 Sähkön menetys ... 52
5.7.2 Järjestelmien 321 ja 324 menetys polttoaineenvaihdon aikana ... 52
5.7.3 Järjestelmän 321 menetys polttoaineenvaihdon aikana ... 53
5.7.4 Reaktoripaineastian pohjavuoto polttoaineenvaihtoseisokissa ... 53
5.7.5 Instrumenttiputken murtuma tietyissä huonetiloissa ... 55
5.7.6 Onnettomuudet polttoaineen käsittelyn yhteydessä ... 55
5.7.7 Jäähdytyskanavan tukkeama tai sortuma ... 56

6 LOVIISAN YDINVOIMALAITOS: YKSIKÖT 1 JA 2 57
6.1 Laitoksen yleiskuvaus ... 57
6.2 Laitoksen turvallisuus ... 60
6.3 Vuosihuollot ... 64
6.3.1 Seisokin käyttötilat ... 64
6.3.2 Alasajo tehoajolta kylmäseisokkiin ... 65
6.3.3 Jälkilämmön poisto ... 66
6.3.4 Järjestelmien erotukset ... 66
6.3.5 Polttoaineen vaihto ... 67
6.3.6 Seisokin aikana tehtävät huolto- ja tarkastustyöt ... 67
6.3.7 Ylösajo ... 68
6.4 Seisokkitilojen PRA ... 68
6.4.1 Raskaiden taakkojen pudotukset ... 70
6.4.2 Laimennusriskit ... 71
6.4.3 Öljyonnettomuudet ... 71
6.4.4 Primääripiirin vuodot ... 72
6.4.5 Sähkön menetykset ... 72
6.4.6 Jälkilämmön poiston menetys ... 72
6.4.7 Korkea merivesi ... 73
6.4.8 Paloriskit ... 74
6.5 Seisokkitilojen FSAR-analyysit ... 74

6.5.1 Pieni primääripiirin jäähdytevuoto kuumaseisokissa 75
6.5.2 Suuri primääripiirin vuoto kuumaseisokissa 76
6.5.3 RR-jäähdytyksen menetys kuumaseisokissa 77
6.5.4 Täydellinen vaihtosähkön menetys kuumaseisokissa 77
6.5.5 Pieni primääripiirin jäähdytevuoto kylmässä seisokissa 78
6.5.6 Suuri primääripiirin jäähdytevuoto kylmässä seisokissa 79
6.5.7 RR-järjestelmän menetys kylmässä seisokissa 80
6.5.8 Sammutetun reaktorin alikriittisyyden vaarantavat tapahtumat latausseisokissa 81
6.5.9 Jälkilämmön poiston menetys latausseisokissa 83
6.5.10 Primääripiirin vuodot latausseisokissa 84
6.5.11 Raskaan esineen putoaminen avonaisen reaktorin päälle latausseisokissa 85
6.6 Seisokkitilojen TTKE 85
6.6.1 Jälkilämmönpoistojärjestelmät RR ja vara-RR 85
6.6.2 Polttoainealtaan jäähdytysjärjestelmä TG 86
6.6.3 Hätäjäähdytysjärjestelmä TH 86
6.6.4 Varahätäsyöttövesijärjestelmä RL94/97 87
6.6.5 Välijäähdytysjärjestelmä TF 87
6.6.6 Sivumerivesijärjestelmä VF 88
6.6.7 Laitoslisävesijärjestelmä RV 88
6.6.8 Alikriittisyyden varmistaminen 88
6.6.9 Huonetilojen ilmastointi / jäähdytys 89
6.6.10 Sähkönsyöttö 90
6.6.11 Palontorjunta 90
6.6.12 Kuumaseisokkiin liittyvät erityisvaatimukset 91
6.6.13 Kylmäseisokkiin liittyvät erityisvaatimukset 92
6.6.14 Latausseisokkiin liittyvät erityisvaatimukset 92
6.7 Häiriö- ja hätätilanneohjeet 93
6.7.1 Jälkijäähdytyksen menetys kylmässä seisokissa 93
6.7.2 Polttoainealtaan jäähdytysjärjestelmien TG20 ja TG40 samanaikainen vikaantuminen 96
6.7.3 Laitoksen täydellinen ulkoisen sähkönsyötön menetys 97
6.7.4 Alijäähtyminen (suppo), levä öljy 97
6.7.5 Polttoaineen käsittelyonnettomuus tai raskaan esineen putoaminen polttoainealtaaseen tai reaktoriin 98

7 JOHTOPÄÄTÖKSET OHJEIDEN KATTAVUUDESTA 100
7.1 Olkiluoto 100
7.2 Loviisa 103

8 YHTEENVETO 107

9 LÄHDELUETTELO 109

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

BWR	Boiling Water Reactor, kiehutusvesireaktori
CDF	Core Damage Frequency, sydänvauriotaajuus
DBA	Design Basis Accident, suunnitteluperustaonnettomuus
E	Lämmönvaihdin
ENSREG	European Nuclear Safety Regulators Group, Euroopan Unionin ydinturvallisuusryhmä
EPR	European Pressurized Water Reactor, painevesireaktorityyppi
FSAR	Final Safety Analysis Review, lopullinen turvallisuusseloste
IAEA	International Atomic Energy Agency, kansainvälinen atomienergiajärjestö
INES	International Nuclear and Radiological Event Scale, ydinlaitostapahtumien ja ydinonnettomuuksien luokitusasteikko
LOCA	Loss of Coolant Accident, jäähdytteenmenetysonnettomuus
LO	Loviisa
NRC	Nuclear Regulatory Commission, USA:n ydinturvallisuusviranomainen
NUREG	Nuclear Regulatory Group, ydinturvallisuusryhmä
OL	Olkiluoto
P	Pumppu
PORV	Pilot-operated Relief Valve, esiohjattu varoventtiili
PRA	Probabilistic Risk Analysis, todennäköisyysperusteinen riskianalyysi
SSR	Specific Safety Requirements, erityiset turvallisuusvaatimukset
STUK	Säteilyturvakeskus
TTKE	Turvallisuustekniset käyttöehdot
TVO	Teollisuuden Voima Oy
VVER	Vodo-Vodjanoi Energetitseskii Reaktor, venäläinen vesijäähdytteinen ja vesihidasteinen energiaa tuottava painevesireaktorityyppi
YVL	Ydinvoimalaitos

Järjestelmätunnukset Olkiluoto

211	Reaktoripainesäiliö
221	Säätösauvat
222	Säätösauvojen toimilaitteet
311	Reaktorin päähöyryputket
312	Syöttövesijärjestelmä
314	Ulospuhallusjärjestelmä
321	Sammutetun reaktorin jäähdytysjärjestelmä
322	Suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmä
323	Reaktorisydämen ruiskutusjärjestelmä
324	Polttoaine- ja reaktorialtaiden jääähdytys- ja puhdistusjärjestelmä
327	Apusyöttövesijärjestelmä
331	Reaktoriveden puhdistusjärjestelmä
336	Näytteenottojärjestelmä
354	Pikasulkujärjestelmä
662	Dieselvarmistettu 660 V verkko
712	Sammutetun reaktorin merivesijärjestelmä
713	Dieselvarmennettu merivesijärjestelmä
721	Sammutetun reaktorin välijäähdytysjärjestelmä
723	Dieselvarmennettu välijäähdytysjärjestelmä
733	Täyssuolanpoistetun veden jakelujärjestelmä
861	Palovesijärjestelmä

Järjestelmätunnukset Loviisa

MF	Paloilmoitinjärjestelmä
TB	Boorin syöttöjärjestelmä
TC	Primääriveden puhdistusjärjestelmä
TF	Hätälämmönsiirtojärjestelmä
TH	Hätäjäähdytysjärjestelmä
TJ	Hätälisävesijärjestelmä

TK	Lisävesijärjestelmä
TQ	Suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmä
YB	Höyrystin
YC	Reaktori
YM	Polttoaine
YP	Paineenhallintajärjestelmä
TG	Polttoainealtaiden jäähdytysjärjestelmä
TF	Välijäähdytysjärjestelmä
UA, UJ	Palonsammutusjärjestelmät
UX	Savunpoistojärjestelmät
Vara-RR	Varalla oleva primääripiirin seisontajäähdytysjärjestelmä
VC	Päämerivesijärjestelmä
VF	Sivumerivesijärjestelmä
RL	Pääsyöttövesijärjestelmä
RL 94/97	Varahätäsyöttövesijärjestelmä
RV	Laitoslisävesijärjestelmä
RR	Primääripiirin seisontajäähdytysjärjestelmä
RY	Höyrystimien ulospuhallusjärjestelmä
UV, UW	Ilmastointijärjestelmät
XL	Jäälauhdutin
XU	Suojarakennuksen vesiruiskutusjärjestelmä

1 JOHDANTO

Ydinvoimalaitosten turvallinen ja laadukas käyttötoiminta edellyttää säännöllistä huoltoa. Ydinvoimalaitoksissa tärkeimmät huoltotoimenpiteet suoritetaan keskitetysti vuosittaisissa huoltoseisokeissa, joita kutsutaan vuosihuolloiksi. Vuosihuolloissa suoritetaan monenlaisia huolto- ja kunnostustöitä ja lisäksi osa reaktorissa olevasta polttoaineesta vaihdetaan uuteen. Yleisimmissä ydinvoimalaitostyypeissä polttoaineen vaihto edellyttää reaktorin ajamista kylmään seisokkitilaan, jolloin reaktori tuottaa vain pientä jälkilämpötehoa.

Ydinvoimalaitosten turvallisuusjärjestelmät on yleisesti mitoitettu tehoajon aikaisten onnettomuuksien varalle, jolloin lämpöteho on pikasulusta huolimatta seisokkitiloja korkeampi. Reaktorin matalan tehotason vuoksi vuosihuoltojen aikana tapahtuvissa häiriötilanteissa on operaattoreilla yleensä käytettävissä riittävästi aikaa tilanteen saamiseksi hallintaan ennen reaktorisydämen ylikuumenemista ja onnettomuuden syntymistä. Tämän vuoksi seisokin aikaisia käyttötiloja on perinteisesti pidetty tehoajoon verrattuna turvallisina.

Reaktorin matalasta tehotasosta huolimatta vakavienkaan onnettomuuksien uhkaa ei voida seisokin aikana sulkea pois. Ydinvoimalaitoksilla on tunnistettu monia vuosihuoltojen aikaisia alkutapahtumia, jotka voivat johtaa sydänvaurioon. Hitaasti kehittyväkin onnettomuus voi aiheuttaa vakavat seuraukset, mikäli turvallisuusjärjestelmien toiminta menetetään pitkäksi ajaksi. Eräille ydinvoimalaitoksille tehtyjen turvallisuusarvioiden mukaan vuosihuoltojen aikainen sydänvaurioriski on jopa suurempi kuin tehoajon aikainen. [23]

1.1 Työn tausta

Diplomityö on tehty Säteilyturvakeskuksen (STUK) Ydinvoimalaitosten valvontaosaston Käyttöturvallisuustoimistolle. STUK on ydinvoiman ja säteilyn käytön turvallisuutta valvova viranomainen Suomessa. STUKin Ydinvoimalaitosten valvontaosaston tehtävänä on osallistua suomalaisten ydinvoimalaitosten suunnittelun,

rakentamisen ja käytön aikaiseen turvallisuuden valvontaan. Ydinvoimalaitosten valvontaosastoon kuuluvan Käyttöturvallisuustoimiston tehtävänä on valvoa käytössä olevien ydinvoimalaitosten käytön turvallisuutta sekä rakenteilla olevien laitosten käyttötoimintaan valmistautumista.

Diplomityön aihe, *Vuosihuoltojen aikainen käyttöturvallisuus*, tuli ensimmäisen kerran esille keväällä 2012, kun sopivia diplomityöaiheita kartoittaessa Käyttöturvallisuustoimistossa havaittiin tarvetta kattavalle vuosihuoltojen aikaista käyttöturvallisuutta käsittelevälle selvitykselle.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Diplomityön tavoitteena oli koota kattava yhteenveto Suomessa käytössä olevien ydinvoimalaitosten vuosihuoltojen aikaisesta käyttöturvallisuudesta sekä arvioida voimayhtiöiden laatimien häiriö- ja hätätilanneohjeiden kattavuutta. Työssä esitetään laitoskohtaisesti yleistä tietoa ydinvoimalaitosten vuosihuolloista, käydään läpi vuosihuollon vaiheet sekä tarkastellaan merkittävimpiä vuosihuoltojen aikaisia riskejä. Työssä pyrittiin havaitsemaan ohjeistossa olevia mahdollisia puutteita ja luomaan niihin parannusehdotuksia. Ohjeiston lisäksi myös voimayhtiöiden tekemien FSAR- ja PRA-analyysien sekä TTKE-ehtojen kattavuutta arvioitiin.

Työhön otettiin tarkasteltavaksi Loviisan molemmat laitosyksiköt sekä Olkiluodon laitosyksiköt 1 ja 2. Rakenteilla oleva Olkiluodon kolmas laitosyksikkö päätettiin jättää työn ulkopuolelle, koska kyseessä on täysin uusi reaktorityyppi, eikä täten laitoksen vuosihuolloista ole vielä kokemusta. Työstä rajattiin pois myös ulkomaiset laitokset, koska työn laajuus olisi silloin kasvanut liian suureksi.

1.3 Työn rakenne

Luvussa 2 esitetään yleiset ydinturvallisuusperiaatteet sekä erilaiset käytössä olevat turvallisuuden arviointimenetelmät. Luvussa 3 esitetään yleistä tietoa ydinvoimalaitosten vuosihuoltoseisokeista. Luvussa 4 käydään läpi erilaisia vuosihuoltoja koskevia viranomaismääräyksiä, ohjeita ja standardeja. Luvut 5 ja 6

keskittyvät Olkiluodon ja Loviisan laitosyksiköihin. Niissä esitetään yleistietoja laitoksista ja niiden vuosihuolloista sekä käydään läpi laitosten seisokkitiloja koskevat PRA- ja FSAR-analyysit, TTKE-ehdot, sekä häiriö- ja hätätilanneohjeet. Luvussa 7 esitetään ohjeiden kattavuudesta tehdyt johtopäätökset sekä muut ohjeista, FSAR:ista ja TTKE:sta esille tulleet havainnot. Luvussa 8 esitetään yhteenveto työstä.

2 YDINVOIMAN KÄYTÖN TURVALLISUUS

Ydinvoiman käytölle on ehdottomana edellytyksenä korkea turvallisuus. Ensisijainen turvallisuustavoite on onnettomuuksien syntymisen estäminen. Vaikka ydinvoimalaitosten turvallisuutta on vuosien saatossa onnistuttu parantamaan, ei vakavan onnettomuuden uhkaa voida täysin sulkea pois edes uusimmissa entistä turvallisemmiksi suunnitelluissa reaktorityypeissä. Tämän takia ydinvoiman käytössä tulee varautua myös onnettomuuksiin ja niiden seurausten lieventämiseen.

Japanin Fukushimassa maaliskuussa 2011 tapahtuneen vakavan reaktorionnettomuuden seurauksena Euroopan komissio yhdessä EU:n ydinturvallisuusviranomaisten ryhmän (ENSREG) kanssa toteutti ydinvoimalaitosten ulkoisia uhkia käsittelevät stressitestit EU-maiden ydinvoimaloissa. Stressitestin seurauksena myös Suomessa toimivissa ydinvoimalaitoksissa alettiin suunnitella parannuksia turvallisuusjärjestelmiin. [64] Fukushiman onnettomuuden vuoksi ydinvoiman suosio laski monissa maissa, ja muun muassa Saksassa päädyttiin ratkaisuun luopua ydinvoimasta kokonaan.

Tässä luvussa esitetään ydinvoimalaitosten turvallisuusjärjestelmien toteutuksessa käytettäviä yleisiä ydinturvallisuusperiaatteita. Lisäksi esitetään tärkeimmät ydinvoimalaitosten turvallisuuden arvioinnissa käytettävät menetelmät.

2.1 Yleiset turvallisuusperiaatteet

Ydinvoimalaitosten turvallisuusperiaatteisiin kuuluu onnettomuuksiin ja muihin poikkeaviin tilanteisiin varautuminen. Tämän vuoksi ydinvoimalaitokset on varustettu useilla erilaisilla turvallisuusjärjestelmillä. Turvallisuusjärjestelmien suunnittelussa noudatetaan yleisiä turvallisuusperiaatteita, joista tärkeimmät esitetään seuraavaksi.

2.1.1 Rinnakkaisperiaate

Rinnakkaisperiaatteessa yhden turvallisuustoiminnon toteuttamiseksi on olemassa useita rinnakkaisia osajärjestelmiä. Tällöin yhden osajärjestelmän menetys ei johda koko turvallisuustoiminnon menetykseen. Turvallisuusjärjestelmät voidaan toteuttaa

esimerkiksi niin, että turvallisuustoiminnon toteuttamiseen riittää yhden osajärjestelmän toiminta kolmesta tai kahden neljästä (3 x 100 % tai 4 x 50 % järjestelmä). [57, s. 100-105]

2.1.2 Erilaisuusperiaate

Erilaisuusperiaatteessa rinnakkaiset osajärjestelmät on toteutettu erilaisella toimintaperiaatteella. Erilaisuusperiaatteen avulla voidaan pienentää turvallisuusjärjestelmien samasta syystä johtuvan samanaikaisen vikaantumisen aiheuttamaa riskiä. Esimerkiksi reaktorin alasajo voidaan vaihtoehtoisesti suorittaa ajamalla säätösauvat sydämeen tai ruiskuttamalla booriliuosta reaktoriin. [57, s. 103]

2.1.3 Erotteluperiaate

Erotteluperiaatteessa eri osajärjestelmiin kuuluvat komponentit sijoitetaan fyysisesti erilleen toisistaan. Tällä järjestelyllä pystytään paremmin estämään osajärjestelmien samanaikainen vikaantuminen ulkoisesta syystä, kuten tulipalosta tai tulvasta, johtuen. Yleisin tapa toteuttaa erottelu on sijoittaa rinnakkaiset osajärjestelmät eri huonetiloihin sekä asettamalla niiden välille rakenteellisia esteitä kuten tulvamuureja tai palo-ovia. [57, s. 103]

2.1.4 Turvallisen tilan periaate

Turvallisen tilan periaatteessa tietyn järjestelmän menettäessä käyttövoimansa, sen tulee automaattisesti palautua tilaan, joka oletetaan laitoksen käytön kannalta turvallisimmaksi. Esimerkiksi turvallisuusjärjestelmien automaattista käynnistymistä ohjaava sähköinen suojausjärjestelmä toteutetaan siten, että suojausjärjestelmän sähkönsyötön menetys johtaa suojausehdon laukeamiseen ja turvallisuusjärjestelmän käynnistymiseen. [57, s. 104]

2.1.5 Syvyyssuuntaisen puolustuksen periaate

Ydinvoiman käytössä yksi tärkeimmistä turvallisuusperiaatteista on moninkertaisten peräkkäisten toiminnallisten ja rakenteellisten esteiden hyödyntäminen, eli niin sanottu

syvyyssuuntainen puolustus. Syvyyssuuntaisessa puolustuksessa turvallisuustoiminnot toteutetaan peräkkäisillä toisiaan varmistavilla rakenteellisella ja toiminnallisilla tasoilla. Turvallisuutta varmistavat tasot voidaan erottaa onnettomuuksia ehkäiseviin, suojaaviin ja lieventäviin tasoihin. Yhden turvallisuutta ylläpitävän tason menetys ei tällöin yksistään johda onnettomuuden syntyyn, vaan siihen tarvitaan aina useiden peräkkäisten tasojen menetys. [57, s. 101]

Tätä periaatetta sovelletaan esimerkiksi radioaktiivisen materiaalin leviämisen estämisessä, jossa turvallisuutta ylläpitävät tasot voidaan käsittää peräkkäisinä leviämisesteinä. Lähes kaikki radioaktiivinen materiaali sijaitsee ydinpolttoaineessa. Sen leviämisen estävät peräkkäiset tasot voidaan jakaa seuraavasti:

- Ensimmäinen leviämiseste on itse polttoaine, joka on polttoainesauvoissa kiinteinä pelletteinä.
- Toinen leviämiseste on polttoainesauvan kaasutiivis suojakuori.
- Kolmas leviämiseste on reaktorisydämen jäähdytyspiirin seinämä, eli reaktoripainesäiliö tai reaktorin primääripiiri.
- Neljäs leviämiseste on reaktoria ympäröivä suojarakennus, jonka tehtävänä on onnettomuuden sattuessa pitää radioaktiivinen materiaali sisällään.
- Viides ja viimeinen leviämiseste on reaktorirakennus, johon uusissa reaktoreissa (muun muassa OL3) sisältyy lentokoneen törmäyksen kestävä ulompi suojakuori. [57, s. 101]

2.2 Turvallisuuden arviointi

Tärkeimmät ydinvoimalaitosten turvallisuuden arviointiin käytetyt menetelmät ovat deterministinen turvallisuusanalyysi ja todennäköisyysperusteinen riskianalyysi, jotka esitetään seuraavaksi.

2.2.1 Deterministinen turvallisuusanalyysi

Deterministinen turvallisuusanalyysi on ydinturvallisuuden arvioinnissa yleisesti käytetty menetelmä, jonka avulla voidaan tutkia onnettomuustilanteiden etenemistä ja sitä, kuinka hyvin laitoksen tekniset ratkaisut täyttävät niille asetetut turvallisuusvaatimukset. [57, s. 96]

Deterministinen turvallisuussuunnittelu perustuu siihen, että tiettyjen tapahtumien tai olosuhteiden odotetaan tapahtuvan niiden todennäköisyydestä riippumatta. Pahimpien mielekkäästi kuviteltavissa olevien tapahtumien ja olosuhteiden aiheuttamia onnettomuuksia pidetään suunnitteluperustaonnettomuuksina (DBA, Design Basis Accident), joiden perusteella reaktorin turvallisuusjärjestelmät tulee mitoittaa siten, että ne kykenevät selviytymään ilman sydänvaurioita toimiessaan vähimmäiskapasiteetillaan. [57, s. 96]

2.2.2 Todennäköisyysperusteinen riskianalyysi

Todennäköisyysperusteisen riskianalyysin (PRA, Probabilistic Risk Assessment) avulla selvitetään kvantitatiivisesti ydinvoimalaitoksen riskejä. PRA:n perusteella voidaan arvioida onnettomuuksien estämiseen tai niiden seurausten lieventämiseen suunniteltuja turvallisuustoimintoja ja niiden toteuttamiseen tarvittavien järjestelmien toimivuutta. [57, s. 126-129]

PRA:ta käytetään rinnakkain deterministisen onnettomuusanalyysin kanssa niin, että menetelmät täydentävät toisiaan. PRA on hyvä apuväline kun pyritään tunnistamaan monimutkaisten tapahtumaketjujen aiheuttamia riskejä, joiden osalta deterministinen arviointi on monesti puutteellinen. PRA:n avulla voidaan arvioida esimerkiksi yhteisvikojen ja inhimillisten tekijöiden vaikutusta. [57, s. 126-129]

PRA:sta on olemassa kolme eri tasoa. Tason 1 PRA:ta käytetään sydänvauriotaajuuden (CDF, Core Damage Frequency) laskentaan. Sydänvauriotaajuus kertoo kuinka usein on odotettavissa onnettomuus, jossa reaktorisydän vaurioituu. PRA:n taso 2 keskittyy onnettomuuden seurauksena leviävän radioaktiivisen päästön arviointiin ja taso 3

onnettomuuden ympäristölle ja ihmisille aiheuttavan riskin arviointiin. Tässä diplomityössä perehdytään pääasiassa tason 1 PRA:han. PRA:n tasot on esitetty taulukossa 1. [57, s. 130-131]

Taulukko 1. PRA koostuu kolmesta tasosta. [57, s. 130-131]

PRA:n tasot	
Taso 1	Reaktorisydämen vaurioitumiseen johtavat tapahtumaketjut ja vaurioitumisen todennäköisyys
Taso 2	Laitokselta ympäristöön tapahtuvan radioaktiivisten aineiden päästön todennäköisyys, suuruus ja ajoittuminen
Taso 3	Radioaktiivisten aineiden päästön aiheuttamat riskit ihmisille, ympäristölle ja omaisuudelle

PRA:ta käytetään myös paljastamaan suunnittelun puutteita ja virheitä. Sen avulla voidaan tehdä esimerkiksi seuraavankaltaisia havaintoja:

- Suunnitteluperusteet ovat riittämättömät
- Sydänvauriotaajuus on liian suuri
- Suojarakennuksen eheyttä ei pystytä luotettavasti varmistamaan

Nykyään voimayhtiöt ylläpitävät ajantasaista PRA:ta (living PRA), jota päivitetään jatkuvasti havaittaessa uusia turvallisuuteen vaikuttavia seikkoja tai laitosmuutosten yhteydessä tapahtuvia muutoksia. [61]

3 YDINVOIMALAITOSTEN VUOSIHUOLTOSEISOKIT

Ydinvoimalaitosten vuosihuollot ovat tärkeä osa laitoksen käyttöä. Vuosihuoltojen aikana tehdään polttoaineenvaihdon lisäksi monia tärkeitä huolto- ja tarkastustöitä. Voimayhtiöille vuosihuollot ovat erittäin tärkeitä tapahtumia monesta syystä, ja niitä varten tulee valmistautua huolellisesti. Vuosihuollot tarjoavat erinomaisen mahdollisuuden kehittää laitoksen turvallisuutta ja toimintakykyä. Hyvin suunnitelluilla ja toteutetuilla vuosihuolloilla pystytään myös merkittävästi edesauttamaan laitosten kestoa ikääntymisen aiheuttamia ongelmia vastaan.

3.1 Vuosihuoltojen kesto ja ajankohta

Paine- ja kiehutusvesireaktoreissa vuosihuoltojen taajuuden määrittää polttoaineen käyttöjakson pituus, sillä niissä polttoaineen vaihto vaatii reaktorin alasajon kylmään seisokkiin. Yleisin käyttöjakson pituus on yksi vuosi, mikä on käytössä myös Loviisan ja Olkiluodon käynnissä olevissa yksiköissä. Myös Olkiluodon kolmannelle laitosyksikölle on alustavasti suunniteltu otettavan käyttöön yhden vuoden latausväli.

Vuosihuoltojen ajankohta pyritään valitsemaan siten, että siitä syntyvä haitta sähkömarkkinoille olisi mahdollisimman pieni. Tämän vuoksi vuosihuoltoja ei pidetä talvella, jolloin sähkön kysyntä Pohjoismaissa on korkeimmillaan. Vuosihuollon ajankohtaan vaikuttaa myös vuosihuoltotöissä tarvittavien ulkopuolisten urakoitsijoiden saatavuus. Ulkopuolisen työvoiman määrä voi laajassa vuosihuollossa olla yli 1000 henkilöä. [5]

Taloudellisista syistä vuosihuoltojen kesto pyritään minimoimaan, sillä jokainen seisokkipäivä aiheuttaa suuren menetyksen sähköntuotannossa. Vuosihuoltojen kesto riippuu laitostyypistä ja siitä, kuinka laajoja töitä vuosihuoltojen aikana on suunniteltu tehtäväksi. Kansainvälisen atomienergiajärjestön IAEA:n mukaan vuosihuollot voidaan keston ja tehtyjen töiden laajuuden mukaan jakaa taulukon 2 mukaisesti. [6, s. 7]

Taulukko 2. Vuosihuollot voidaan jakaa keston mukaan eri tyyppeihin seuraavasti.

Seisokki	Kesto (vrk.)
Polttoaineenvaihtoseisokki	7-10
Polttoaineenvaihto- ja huoltoseisokki	14-21
Polttoaineenvaihtoseisokki ja laaja huoltoseisokki	n. 30
Erikoisseisokki	30+

3.2 Vuosihuollon aikana tehtävät työt

Vuosihuollossa tehtävien töiden määrä ja laajuus riippuu vuosihuollon tyypistä. Polttoaineenvaihtoseisokissa ainoa merkittävä ennalta suunniteltu työ on polttoaineen vaihto. Tämän lisäksi suoritetaan erilaisia tarkastuksia ja pieniä huoltotöitä. Vuosihuollon kesto määrittyy polttoaineen vaihdossa kuluvan ajan mukaan noin viikosta kahteen viikkoon riippuen reaktorityypistä. Mikäli tarkastuksissa havaitaan puutteita, joiden korjaamisen katsotaan olevan kiireellistä, voi vuosihuollon kesto tämän vuoksi pitkittyä. [6, s. 7]

Huoltoseisokissa tehdään polttoaineen vaihdon lisäksi ennalta suunniteltuja huoltotöitä. Huoltoseisokissa huolletaan muun muassa venttiilejä ja niiden toimilaitteita, säätösauvakoneistoja, sähköjärjestelmiä, turbiineita, pumppuja ja kompressoreja. Lisäksi huoltoseisokin aikana tehdään paljon koestuksia ja tarkastuksia. Huoltoseisokin kesto on yleensä kahdesta kolmeen viikkoon.[6, s. 7]

Laaja huoltoseisokki on kestoltaan normaalia huoltoseisokkia pidempi. Laajan huoltoseisokin aikana voidaan suorittaa työläitä ja pitkäkestoisia operaatioita, joiden suorittamiseen ei olisi normaalissa huoltoseisokissa tarpeeksi aikaa. Laajojen huoltoseisokkien kesto on noin 30 päivää. [6, s. 7]

Erikoisseisokit ovat kestoltaan jopa useita kuukausia. Tällaisia ovat esimerkiksi laitosten merkittävät modernisointityöt ja tehonkorotukset. Tällaisia seisokkeja on viime vuosina ollut esimerkiksi Ruotsissa, jossa laitosten tehoja on nostettu mittavilla laitosmuutoksilla [80].

3.3 Vuosihuollon vaiheet

Vuosihuollot aloitetaan ajamalla ydinvoimalaitos tehoajolta kylmään seisokkitilaan. Alasajo suoritetaan keskeyttämällä lämpöä tuottava ketjureaktio reaktorisydämessä, eli ajamalla reaktori alikriittiseen tilaan. Alasajon toteuttaminen eroaa hieman eri reaktorityypeissä. Reaktorin alikriittisenä pysyminen seisokin aikana varmistetaan siirtämällä kaikki neutroneja absorboivat säätösauvat reaktoriin, jonka lisäksi painevesireaktoreissa primääripiirin jäähdytteeseen sekoitetaan neutroneita absorboivaa boorihappoa.

Ketjureaktion pysäytyksestä huolimatta reaktorin tehontuotanto ei lakkaa kokonaan, vaan fissiotuotteiden hajoamisesta aiheutuu niin sanottua jälkilämpötehoa. Jälkilämpöteho on suurimmillaan heti reaktorin alasajon jälkeen ja se laskee seisokin kuluessa. Reaktorin jäähdyttäminen on edelleen tärkeää, sillä pelkkä jälkilämpöteho riittää polttoaineen sulamiseen, jos jäähdytys menetetään. Seisokin aikana reaktorin jälkilämpöä poistetaan erityisellä jälkilämmönpoistojärjestelmällä.

Kun reaktorin lämpötila ja paine on saatu laskettua riittävän alas, voidaan siirtyä polttoaineen vaihtoon. Polttoaineenvaihtoa varten reaktorin painesäiliön kansi ja osa reaktorin sisäosista irrotetaan, jotta polttoaine pystytään vaihtamaan. Polttoaineenvaihtotyöt käsittävät uuden polttoaineen latauksen lisäksi myös polttoaineen sisäisiä siirtoja. Polttoaineenvaihdon valmistuttua tehdään lopputarkastus, jossa todetaan latauksen olevan ennalta tehdyn lataussuunnitelman mukainen. Lopuksi reaktorista irrotetut osat ja painesäilön kansi kiinnitetään takaisin.

Muita huoltotöitä tehdään seisokin aikana ennalta tehtyjen suunnitelmien mukaisesti. Tämän lisäksi mahdollisesti havaitut viat ja puutteet eri järjestelmissä korjataan ja pyritään selvittämään mistä vikaantuminen on aiheutunut. Ylösajossa laitoksen tehoa nostetaan vähitellen sekä suoritetaan vaadittavat ylösajoon liittyvät kokeet. Lopulta laitos tahdistetaan takaisin sähköverkkoon ja uusi käyttöjakso voi alkaa.

3.4 Vuosihuoltojen suunnittelu

Hyvällä suunnittelulla voidaan edesauttaa vuosihuoltojen onnistumista niin turvallisuuden kannalta kuin taloudellisesti. IAEA:n mukaan voimayhtiön tulee laatia suunnitelmat tuleville vuosihuolloille pitkälle, keskipitkälle ja lyhyelle aikavälille. [8, s. 9]

Pitkän aikavälin suunnitelmat tehdään 5 – 10 vuodeksi eteenpäin. Niissä tulee ottaa huomioon esimerkiksi polttoaineen käytön optimointi, laitoksen ja järjestelmien ikääntyminen, suurien huoltotöiden ja modernisointien tarve sekä turvallisuussäännösten täyttyminen. Keskipitkän aikavälin vuosihuoltosuunnittelu kattaa seuraavat 2 – 5 vuotta. Se on pitkän tähtäimen suunnitelmaa yksityiskohtaisempi, ja siinä otetaan huomioon paremmin muun muassa sähkömarkkinoiden tilanne, henkilöstön ja materiaalien tarve ja mahdollisten muutostöiden teknisten vaatimusten täyttyminen. Lyhyen aikavälin vuosihuoltosuunnittelu käsittää yhden vuosihuoltoseisokin yksityiskohtaisen suunnitelman. Hyvä käytäntö on aloittaa seuraavan vuosihuoltosuunnitelman tekeminen jo heti uuden käyttöjakson alussa. [8, s. 9]

3.5 Vuosihuollon aikainen turvallisuus

Merkittävin ero laitoksen turvallisuudessa tehoajon ja vuosihuollon välillä on reaktorin käyttötilassa, joka seisokin aikana on alikriittinen kylmä tila. Tämän ansiosta vuosihuollon aikaisissa sydämen jäähdytystä uhkaavissa tapahtumissa on operaattoreilla enemmän aikaa korjaavien toimenpiteiden suorittamiseen laitoksen saattamiseksi turvalliseen tilaan. Toisaalta vuosihuollon aikana osa turvallisuusjärjestelmistä joudutaan erottamaan huoltojen ajaksi, mikä kasvattaa seisokin aikaisia riskejä tehoajoon verrattuna.

Vuosihuollon aikana ydinvoimalaitoksen turvallisuus pohjautuu samoihin periaatteisiin kuin tehoajon aikana. Tärkeimpien turvallisuustoimintojen käytettävyys tulee olla varmistettu siten, että yksittäisen laitteen toimintavika tai yksittäinen virheellinen

toimenpide ei saa johtaa reaktorin jäähdytyksen tai lisäveden syöttömahdollisuuden menetykseen. Reaktorin sammutusmarginaalin on lisäksi pysyttävä yli yhden prosentin tasolla. [60]

Tärkeimmät vuosihuollon aikaiset turvallisuustoiminnot ovat [60]:

- Reaktorin alikriittisyyden varmistaminen
- Reaktorin vesimäärän riittävyyden varmistaminen
- Reaktorin ja käytetyn polttoaineen jälkilämmön poiston varmistaminen
- Suojarakennuksen tiiveyden varmistaminen sitä edellyttävinä ajankohtina
- Reaktorin ylipainesuojauksen varmistaminen
- Mittaus- ja automaatiojärjestelmien toiminnan varmistaminen
- Sähkönsyötön varmistaminen

4 VUOSIHUOLTOJA KOSKEVAT OHJEET JA STANDARDIT

Vuosihuoltoja varten on laadittu viranomaisten toimesta useita vaatimuksia ja ohjeita joiden mukaan voimayhtiön tulee toimia. Tässä luvussa esitetään Suomen säteilyturvallisuusviranomaisen sekä kansainvälisen atomienergiajärjestön laatimat vuosihuoltoja koskevat vaatimukset, standardit ja ohjeet.

4.1 Säteilyturvakeskus

Suomessa ydinvoimalaitosten turvallisuutta valvova viranomainen on Säteilyturvakeskus, eli STUK. STUKin valvonnan perustana on ydinenergialaki (990/87). Se asettaa ydinenergian käytölle seuraavat ehdot [81]:

- Ydinvoiman käytön on oltava yhteiskunnan kokonaisedun mukaista
- Ydinvoiman käytön on oltava ihmisen ja ympäristön kannalta turvallista
- Ydinvoiman käyttö ei saa edistää ydinaseiden leviämistä

Yksi STUKin tärkeimmistä tehtävistä on laatia ja ylläpitää ydinvoimalaitosohjeita (YVL-ohjeet). YVL-ohjeet koostuvat säännöistä, joita yksittäisen luvanhaltijan (voimayhtiön) tai muun kyseeseen tulevan organisaation on noudatettava, ellei STUKille ole esitetty muuta hyväksyttävää menettelytapaa tai ratkaisua, jolla YVL-ohjeessa esitetty turvallisuustaso saavutetaan. Ohje ei muuta STUKin ennen ohjeen voimaantuloa tekemiä päätöksiä, ellei STUK erikseen siitä ilmoita. [63]

STUKissa on parhaillaan menossa uudistusprojekti YVL-ohjeiden rakenteen muuttamiseksi. Tässä diplomityössä käsitellään uudistettuja YVL-ohjeita. Osa uusista ohjeista on vielä luonnosvaiheessa, mutta niiden asiasisältö tulee säilymään käytännössä samana myös lopullisissa käyttöön otettavissa versioissa.

Ydinvoimalaitosten vuosihuoltoja käsitellään uudistetussa YVL-ohjeessa A6, *Ydinvoimalaitosten käyttötoiminta*. Ohjeen seitsemäs luku käsittelee seisokkien hallintaa. Siinä annetaan ohjeet, joiden mukaan voimayhtiön tulee toimia seisokin aikana. Ohjeen mukaan voimayhtiön tulee vähintään kuukautta ennen seisokin alkua

selvittää kattavasti STUKille, miten se aikoo varmistaa seisokin aikaiset turvallisuustoiminnot. Seisokin aikana voimayhtiön tulee toimittaa STUKille hyväksyttäväksi selvityksen reaktorin ja polttoaineen käyttäytymisestä viimeistään viikkoa ennen reaktoripainesäiliön kannen suunniteltua sulkemista. Polttoaineenvaihdon jälkeistä ylösajoa varten voimayhtiön tulee hakea STUKilta käynnistyslupaa. Käynnistyslupahakemuksessa tulee selvittää muun muassa yhteenveto seisokin aikaisten turvallisuuden kannalta merkittävien töiden toteutumisesta sekä seisokin aikana tehdyt merkittävät vikahavainnot. [60]

4.2 Turvallisuustekniset käyttöehdot

Turvallisuusteknisissä käyttöehdoissa (TTKE) esitetään laitoksen suunnitteluperusteiden mukaiset laitoksen käyttöä koskevat rajoitukset ja ehdot, määräaikaiskokeita koskevat vaatimukset ja keskeiset hallinnolliset vaatimukset. TTKE käsittää kaikki laitoksen eri käyttötilat ja on aina laitosyksikkökohtainen. TTKE on pidettävä jatkuvasti ajan tasalla: sitä tulee päivittää sen mukaan, kuin laitosmuutokset, turvallisuusanalyysit, käyttökokemukset ja uusin tietämys edellyttävät. TTKE:ssa määritetyt vaatimukset ja käyttörajoitukset perustuvat deterministisiin analyyseihin, minkä lisäksi niiden kattavuuden ja tasapainoisuuden varmistamiseen käytetään apuna PRA:ta. [60]

TTKE:ssa on esitettävä seuraavat laitoksen käytölle asetetut vaatimukset [60]:

- Rajat prosessisuureiden arvoille, jotka suunnittelun perustana olevissa analyyseissa ovat tärkeitä leviämisesteiden eheyden säilymisen kannalta
- Raja-arvot suojaus- ja rajoitusjärjestelmien käynnistymiselle
- Eri käyttötiloissa noudatettavat turvallisuusjärjestelmien perusvaatimukset, raja-arvot, sallitut poikkeamat, käyttörajoitukset ja käynnistettävät toimenpiteet aikamääreineen
- Käyttökuntoisuusvaatimusten alaisten järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden huolto-, tarkastus- ja valvontaohjelma

- Koestusten ja testausten aikaväli, hajautus, käyttötila ja liittyvät ohjeet
- Selvitys käyttökunnottomuutta aiheuttavista ennakkohuolloista
- Hallinnolliset vaatimukset
- Perustelut edellä esitetyille vaatimuksille.

Turvallisuusrajojen määrittelyn tulee tähdätä konservatiivisiin arvoihin, jotta ne kattaisivat epävarmuudet riittävästi. Jos TTKE:ssa asetettuja vaatimuksia ei kyetä täyttämään, on määriteltävä toimenpiteet laitoksen saattamiseksi turvalliseen tilaan määrätyssä ajassa. TTKE:n alaisten laitteiden viat on pääsääntöisesti korjattava mahdollisimman nopeasti.

Mikäli voimalaitos poikkeaa TTKE:sta, sen on osoitettava, että laitoksen turvallisuustaso ei olennaisesti heikkene, eikä poikkeamista ole käytännöllisin toimenpitein mahdollista välttää. Nämä muutokset ja poikkeamat on kuvattava ja perusteltava turvallisuusanalyysien ja riippumattoman turvallisuusarvioinnin avulla. TTKE:n muutokset ja poikkeamat tulee hyväksyttää STUKissa ennen käyttöönottoa. Mikäli laitos on TTKE:n vastaisessa tilassa, on välittömästi ryhdyttävä toimenpiteisiin vaatimusten täyttämiseksi. Näistä tilanteista on myös raportoitava STUKille. [60]

4.3 Lopullinen turvallisuusseloste

Lopullinen turvallisuusseloste (FSAR, Final Safety Analysis Report) on tärkein ydinvoimalaitoksen turvallisuutta käsittelevä dokumentti. FSAR:issa tulee selkeästi osoittaa, miten laitos vastaa sille asetettuja suunnitteluperusteita. Voimayhtiön tulee toimittaa raportin ensimmäisen versio STUKille jo rakentamislupahakemuksen yhteydessä. FSAR on jatkuvasti päivittyvä asiakirja; voimayhtiön tulee päivittää FSAR:ia siten, että se pysyy ajan tasalla laitosmuutosten ja uusien turvallisuushavaintojen myötä. [62]

FSAR:in onnettomuusanalyyseissa tulee käsitellä tapahtumat, jotka luonteeltaan ja vakavuudeltaan kattavat hyvin erityyppiset häiriöt ja onnettomuudet. Onnettomuudet ja käyttöhäiriöt on analysoitava niin, että tilanteen käynnistävästä alkutapahtumasta

edetään toimenpide kerrallaan kohti turvallista tilaa. Laitoksen oletetaan olevan tapahtuman alkuhetkellä tuotantokäytössä nimellistehollaan, ellei jotain muuta käyttötilaa arvioida seurauksiltaan pahemmaksi. Mikäli pahinta mahdollista alkutilaa ei voida luotettavasti nimetä, tulee saman alkutapahtuman seuraukset analysoida useammassa käyttötilassa. Käyttötilan lisäksi myös polttoaineen palamalla voi olla vaikutusta tapahtuman etenemiseen. [62]

4.4 Häiriö- ja hätätilanneohjeet

Häiriö- ja hätätilanneohjeet ovat voimayhtiön laatimia laitoksen käyttöohjeita, joissa esitetään laitoksella tehtävät toimenpiteet erilaisissa käyttöhäiriöissä ja hätätilanteissa. Häiriö- ja hätätilanneohjeiden tulee perustua realistisilla oletuksilla tehtyihin analyyseihin. Häiriö- ja hätätilanneohjeet on pidettävä jatkuvasti ajan tasalla. [60]

Häiriötilanneohjeissa tulee esittää toimenpiteet, joilla pystytään estämään häiriön eteneminen turvallisuutta vaarantavaksi tilanteeksi. Häiriötilanneohjeet on laadittava odotettavissa olevista käyttöhäiriöistä. [60]

Hätätilanneohjeet tulee laatia oletettujen onnettomuuksien ja niiden laajennusten varalle. Niissä tulee esittää keinot, joiden avulla laitos voidaan saattaa hallittuun tilaan. Lisäksi tulee esittää menettelyt laitoksen saattamiseksi hallitusta tilasta edelleen turvalliseen tilaan. Oletettujen onnettomuuksien laajennusten varalle laadituissa hätätilanneohjeissa tulee olla tavoitteena menetettyjen turvallisuustoimintojen palauttaminen tai korvaaminen siten, että sydänvauriot kyetään estämään. [60]

Vakavien onnettomuuksien varalle voimayhtiön tulee laatia onnettomuuden hallintaan liittyvä ohjeisto, jossa esitettyjen toimenpiteiden avulla vakavan onnettomuuden seurauksia pystytään lieventämään. [60]

4.5 IAEA:n standardit ja ohjeet

Kansainvälinen atomienergiajärjestö IAEA (International Atomic Energy Agency) perustettiin vuonna 1957 edistämään ydinvoiman rauhanomaista käyttöä. Nykyään IAEA:ssa on 154 jäsenvaltioita ja sen pääkonttori sijaitsee Wienissä Itävallassa. Suomi on ollut IAEA:n jäsen vuodesta 1958. [27]

IAEA:n tehtäviin kuuluvat [28]:

- Ydinvoiman rauhanomaisen käytön edistäminen IAEA:n jäsenvaltioissa
- Ydinmateriaalin valvonta siten, että sitä ei käytetä salaa sotilaallisiin tarkoituksiin
- Korkean ydinturvallisuuden edistäminen

IAEA laatii turvallisuusvaatimuksia (Fundamental Safety Principles), joita ydinlaitosten käyttäjien tulee noudattaa. Turvallisuusvaatimukset jakautuvat yleisiin (General Safety Requirements) ja yksittäisiin vaatimuksiin (Specific Safety Requirements, SSR). Tämän lisäksi IAEA laatii ohjeita ja teknisiä dokumentteja, jotka ovat apuna ydinvoiman turvallisen käytön edistämisessä. [26]

Turvallisuusvaatimusdokumentti SSR-2.2 käsittelee ydinvoimalaitosten käyttöönottoa ja käyttöä. Sen vaatimus nro 32 käsittelee seisokin hallintaa. Sen mukaan [26]:

- Seisokin suunnittelun tulee olla jatkuvasti kehittyvä prosessi, jossa otetaan huomioon aiemmat, nykyiset ja tulevat seisokit
- Seisokin suunnittelussa etusijalla tulee aina olla laitoksen turvallisuus
- Voimayhtiön tulee varmistaa riittävät resurssit turvallisuuden takaamiseksi seisokissa
- Kaikkien seisokkiin ja sen valmisteluun osallistuvien henkilöiden tehtävät ja vastuut on kirjattava
- Tiedonkulun eri seisokkiin osallistuvien ryhmien välillä tulee olla asianmukaista

- Työntekijöiden säteilysuojelun ja muu työturvallisuuden tulee olla asianmukaista
- Jätteiden ja kemikaalien käsittelyn tulee olla asianmukaista
- Seisokin jälkeen tulee laatia kattava yhteenveto: missä onnistuttiin / missä on kehitystarpeita

5 OLKILUODON YDINVOIMALAITOS: YKSIKÖT 1 JA 2

Teollisuuden Voima Oy (TVO) on kotimaisten energia- ja teollisuusyritysten omistama yhtiö, joka tuottaa omistajilleen sähköä omakustannushintaan. TVO operoi kahta kiehutusvesireaktoria Eurajoen Olkiluodossa. Samalle laitosalueelle on rakenteilla kolmas laitosyksikkö, joka on EPR-tyyppinen painevesireaktori. Kesällä 2010 eduskunta hyväksyi valtioneuvoston myönteisen periaatepäätöksen neljännen laitosyksikön rakentamisesta Olkiluotoon. [73]

Olkiluodossa sijaitsee lisäksi käytetyn polttoaineen välivarasto sekä matala- ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoitusluola. Laitosalueen läheisyydessä sijaitsee myös käytetyn polttoaineen loppusijoituksen tutkimuslaitos Onkalo, jonka toiminnasta vastaa TVO:n ja Fortumin yhteisyritys Posiva Oy. Olkiluodon kallioperään on tulevaisuudessa tarkoituksena loppusijoittaa Olkiluodon ja Loviisan laitoksien käytetty polttoaine.

Kuva 1. Olkiluodon laitosyksiköt 1 ja 2. [49]

5.1 Yleistä tietoa laitoksista

Olkiluodon laitosyksikkö 1 (OL1) kytkettiin ensimmäisen kerran valtakunnan verkkoon syyskuussa 1978 ja laitosyksikkö 2 (OL2) helmikuussa 1980. Laitokset ovat ruotsalaisen ASEA Atom AB:n (nykyisin osa yhdysvaltalaista Westinghousea)

suunnittelemia kiehutusvesireaktoreita. Laitosten alkuperäinen nettosähköteho oli 660 MW laitosyksikköä kohti. Modernisointiprojektien ja laitosmuutosten myötä laitosten nettosähkötehoa on pystytty korottamaan nykyiseen 880 MW:n tehoon laitosyksikköä kohti. [75]

OL1 ja OL2 ovat pieniä yksityiskohtia lukuun ottamatta identtisiä laitoksia. Olkiluodon laitoksien sisarlaitoksia ovat Ruotsissa Forsmarkin laitosyksiköt 1 ja 2 [80]. Taulukossa 3 on esillä eräitä tärkeimpiä teknisiä tietoja laitoksista.

Taulukko 3. Teknisiä tietoja OL1 ja OL2 laitosyksiköistä. [72]

Reaktorin lämpöteho	2500 MW
Nettosähköteho	880 MWe
Hyötysuhde	35,2 %
Höyrynvirtaus	1260 kg/s
Käyttöpaine	70 bar
Syöttöveden lämpötila	185 °C
Tuorehöyryn lämpötila	286 °C
Polttoainenippujen määrä	500
Polttoainesauvoja nipussa	91–100
Polttoainenipun massa	292–331 kg
Uraanin kokonaismassa	n. 90 t
Säätösauvojen lukumäärä	121

Laitosyksiköt ovat tyypiltään kiehutusvesireaktoreita. Painevesireaktoreista poiketen niissä ei ole erillistä höyrystintä, vaan kaikki turbiinille menevä höyry tuotetaan reaktorissa. Reaktorista kuuma höyry johdetaan höyryputkia pitkin turbiinille. Molemmille laitosyksiköillä on oma turbiinirakennus, jossa on yksi höyryturbiini ja generaattori. Höyryn mukana kulkeutuvien radioaktiivisten aineiden takia osassa turbiinirakennusta on käytön aikana korkea säteilytaso, minkä vuoksi sinne kulku on rajoitettua. [72]

Polttoaineniput ovat geometrialtaan neliskulmaisia ja niitä on reaktorissa 500 kappaletta. Säätösauvat ovat poikkileikkauskeltaan ristin muotoisia ja ne on sijoitettu neljän polttoainenipun keskelle siten, että ristin haarat menevät polttoainenippujen

välistä. Reaktorin tehon säätöön voidaan säätösauvojen lisäksi hyödyntää pääkiertopumppujen virtauksen säätöä. Alasajo on mahdollista suorittaa joko säätösauvoilla tai onnettomuustilanteissa syöttämällä neutroneja absorboivaa boorihappoa reaktoriin. [72]

5.2 Turvallisuus

Laitokset ovat toimineet käynnistymisestään asti turvallisesti. Ylimääräisten huolto- ja korjausseisokkien määrä laitoksilla on ollut erittäin vähäinen, mistä kertoo myös laitosten maailman huipputasoa edustavat vuotuiset käyttökertoimet. Laitosyksiköillä ei ole ollut INES 2 -tasoa korkeammalle luokiteltuja tapahtumia. Taulukossa 5 on esitetty laitoksilla olleet INES 2 -tasolle luokitellut tapahtumat. [59]

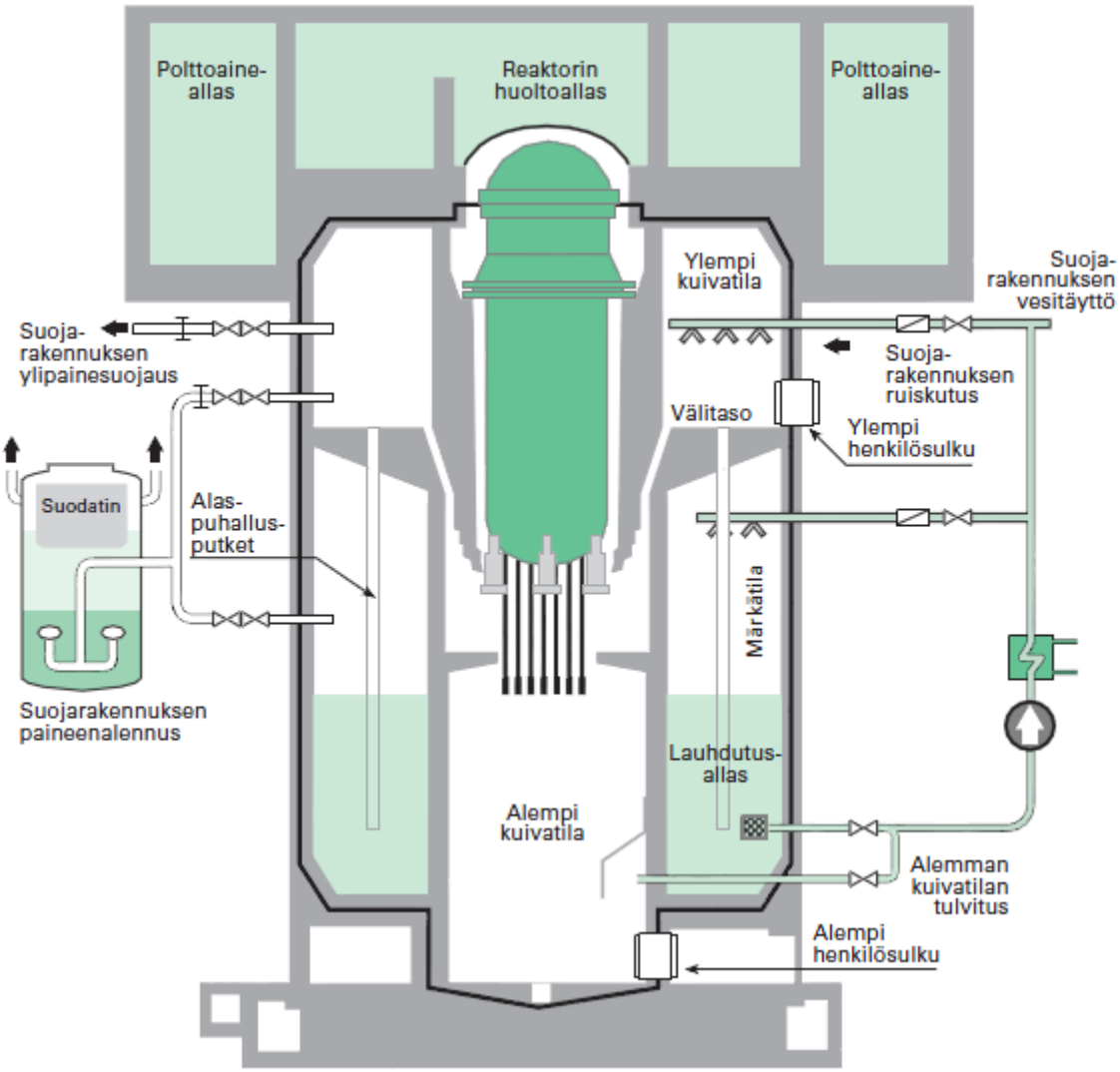
Taulukko 4. INES 2 -luokitellut tapahtumat Olkiluodossa. [59]

Vuosi	Laitosyksikkö	Tapahtuma
1985	OL1/OL2	Ulospuhallusjärjestelmän ohjausventtiiliviat
1989	OL1	Metallijauhetta säätösauvakoneistossa
1991	OL2	Tulipalo, pikasulku ja ulkoisen sähköverkon menetys

Olkiluodon laitosyksiköt varustettiin jo rakentamisvaiheessa kattavilla länsimaiset vaatimukset täyttävillä turvallisuusjärjestelmillä. Turvallisuusjärjestelmät on jaettu neljään rinnakkaiseen osajärjestelmään, jotka on nimetty kirjaimin A, B, C ja D. Pääsääntöisesti osajärjestelmien erottelu on toteutettu siten, että samassa huonetilassa voi olla kahden eri osajärjestelmän komponentteja: A- ja C-osajärjestelmät yhtenä parina ja B- ja D-osajärjestelmät toisena parina. Näitä kahta osajärjestelmäparia erottaa aina joko suuri etäisyys tai fyysinen este, kuten betoniseinä, jotta esimerkiksi tulipalon sattuessa vähintään toinen järjestelmä säilyisi käyttökuntoisena. Yleensä kahden osajärjestelmän toiminta neljästä riittää halutun toiminnan suorittamiseen (4 x 50 % -periaate). [72]

Laitosten suojarakennus on valmistettu esijännitetystä betonista. Suojarakennus koostuu ylemmästä ja alemmasta kuivatilasta sekä lauhdutusaltaan sisältävästä märkätilasta. Suojarakennus on verraten pienikokoinen moniin muihin reaktorityyppiin

verrattuna. Tähän on syynä sisäisten pääkiertopumppujen ja suojarakennuksen lauhdutusjärjestelmän käyttö. Suojarakennuksessa on käytön aikana typpitäyttö, jolla estetään tulipalojen syttymistä suojarakennuksen sisällä. Kulku suojarakennukseen on mahdollista ainoastaan seisokin aikana ylemmän tai alemman henkilösulun kautta. Suojarakennus esitetään kuvassa 2. [17]



Kuva 2. Reaktorin suojarakennus. [57, s.64]

Jäähdytteenmenetysonnettomuuden (LOCA, Loss of Coolant Accident) varalta on kaksi erillistä reaktorisydämen hätäjäähdytysjärjestelmää, joiden avulla saadaan pumpattua vettä reaktoriin erilaisissa vuototilanteissa. Näiden lisäksi suojarakennuksella on oma

hätäjäähdytysjärjestelmä. Hätäjäähdytysjärjestelmät ja niihin liittyvät apujärjestelmät esitellään taulukossa 5. [72]

Taulukko 5. Hätäjäähdytysjärjestelmät. [72]

Tunnus	Järjestelmä
322	Suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmä
323	Reaktorisydämen ruiskutusjärjestelmä
327	Apusyöttövesijärjestelmä
712	Sammutetun reaktorin merivesijärjestelmä
721	Sammutetun reaktorin välijäähdytysjärjestelmä
733	Täyssuolanpoistetun veden jakelujärjestelmä

Apusyöttövesijärjestelmä 327 on korkeapaineinen hätäjäähdytysjärjestelmä. Sitä käytetään pumppaamaan vettä reaktoriin niissä jäähdytteen menetyksissä, joissa reaktorin paine pysyy vuodon alussa korkeana, kuten pienessä sydämen alapuolisessa LOCA:ssa. 327-järjestelmän kapasiteetti riittää pitämään reaktorisydämen veden peitossa minkä tahansa reaktoripaineastian pohjaan liitetyn putken murtumisen aiheuttamassa jäähdytteen menetyksessä. Apusyöttövesijärjestelmä saa veden täyssuolanpoistetun veden jakelujärjestelmän 733 varastoaltaista, joita on neljä kappaletta, yksi kullekin osajärjestelmälle. [72]

Reaktorisydämen ruiskutusjärjestelmää 323 käytetään niissä jäähdytteen menetyksissä, joissa reaktorin paine laskee nopeasti matalle tasolle, esimerkiksi sydämen yläpuolisen putkiyhteen katketessa. Reaktorisydämen ruiskutusjärjestelmä saa tarvitsemansa veden suojarakennuksen märkätilan lauhdutusaltaasta, jonka kapasiteetti riittää pitämään reaktorisydämen veden peitossa useita tunteja ilman ulkopuolista jäähdytystä.

Näiden lisäksi suojarakennuksella on oma jäähdytysjärjestelmänsä, suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmä 322. Sitä käytetään alentamaan suojarakennuksen painetta ja jäähdyttämään lauhdutusaltaan vettä. Järjestelmän avulla on myös mahdollista tulvittaa suojarakennus kokonaan tai osittain vedellä. [72]

Laitoksen sähkönsyöttö on varmistettu moninkertaisesti. Normaalisti tehoajon aikana sähköä saadaan laitosyksikön omalta pääageneraattorilta. Mikäli pääageneraattori ei ole käytettävissä, korvaavaa sähköä saadaan ulkoisista 400 kV tai 110 kV verkoista. Sähkönmenetystilannetta varten molemmat laitosyksiköt on varustettu neljällä dieselgeneraattorilla, jotka käynnistyvät automaattisesti häiriön syntyessä. Tämän lisäksi laitosalueella on kaasuturbiinivoimalaitos, jonka avulla saadaan muutamassa minuutissa toimitettua laitokselle sähköä joko maakaapeliyhteydellä tai 110 kV:n verkosta toisen laitosyksikön kautta. Näiden lisäksi erikoistoimenpiteillä on mahdollista saada sähköä Paneliankosken Voiman 20 kV verkosta tai suoraan Harjavallan vesivoimalaitoksesta. [77]

Reaktorin alasajo voidaan suorittaa kolmella eri menetelmällä. Normaalissa suunnitellussa alasajossa säätösauvat siirretään reaktoriin sähkömoottoreilla varustetuilla toimilaitteilla. Toinen tapa siirtää säätösauvat sydämeen on käyttää hydraulista pikasulkujärjestelmää, jossa säätösauvat työnnetään sydämeen paineistetun veden avulla. Mikäli kumpikaan edellisistä säätösauvoihin perustuvista alasajotavoista ei toimi, voidaan reaktori ajaa alas myös hätäboorausjärjestelmällä, joka ruiskuttaa reaktoriin booriliuosta, joka aiheuttaa ketjureaktion sammumisen. [72]

5.3 Vuosihuollot

Laitosten vuosihuollot on ajoitettu loppukevääseen touko-kesäkuulle. Vuosihuoltojen pituus on suunniteltu siten, että vuorovuosina toisella laitoksella on pelkkä polttoaineenvaihtoseisokki ja toisella pidempi huoltoseisokki. [78]

5.3.1 Vuosihuollon käyttötilat

Laitoksen käyttötilat voidaan jakaa taulukon 6 mukaan. Käyttötila 6 ei ole käytössä Olkiluodossa. Kylmiin seisokkitiloihin lasketaan kuuluviksi käyttötilat 1 ja 7.

Taulukko 6. Laitoksen käyttötilat. [20]

Käyttötila	Käyttötilakytkimen asento	Reaktorin paine / lämpötila	Reaktoriteho (%)
1. Kylmä, sammutettu reaktori	”0”	paineeton / < 100 °C	0
2. Kuuma, sammutettu reaktori	”0” / V-ketju lauenneena	paineeton / paineistettu	0
3. Ydinlämmitys	”SS”	<70 bar	≤ 8
4. Kuumavalmius	”SS”	70 bar	≤ 8
5. Tehoajo	”SS”	70 bar	> 8
7. Polttoaineenvaihto	”B”	paineeton	0

5.3.2 Alasajo kylmään seisokkiin

Reaktorin alasajo tehoajolta kylmään seisokkiin on monivaiheinen prosessi, jossa reaktorin tehon alentamisessa käytetään vuorotellen pääkiertopumppujen virtauksen säätöä ja säätösauvojen asennon säätöä. Tehon alennus 100 – 65 % toteutetaan pääkiertopumppujen kierroslukua laskemalla, jolloin jäähdytteen virtauksen heikkeneminen johtaa aukko-osuuden kasvuun ja edelleen tehon laskuun. Tehon alennus 65 – 15 % toteutetaan työntämällä säätösauvoja reaktoriin. Tehon ollessa 15 % aloitetaan turbiinin alasajo. Reaktorin painetta säädetään dumppaamalla reaktorista höyryä suoraan turbiinilauhduttimeen. [43]

Tehon alennus 15 – 0 % suoritetaan siirtämällä kaikki loput säätösauvat kokonaan sisään reaktorisydämeen. Nyt käyttötilana on kuuma sammutettu reaktori. Seuraavaksi reaktorin painetta alennetaan edelleen ja suljetaan kaikki höyrylinjat. Kun reaktorin paine alittaa 12 baria, aloitetaan jälkilämpötehon poisto sammutetun reaktorin jäähdytysjärjestelmällä 321. Reaktorin lämpötilan laskiessa alle 70 °C ollaan käyttötilassa kylmä, sammutettu reaktori. [44]

5.3.3 Jälkilämmön poisto seisokin aikana

Seisokin aikana reaktorin jälkilämmön poistosta vastaavat sammutetun reaktorin jäähdytysjärjestelmä 321, reaktorialtaan jäähdytys- ja puhdistusjärjestelmä 324 sekä osittain myös reaktoriveden puhdistusjärjestelmä 331. Järjestelmä 321 kytketään

toimintaan alasajovaiheen lopussa reaktorin höyrylinjojen sulkemisen jälkeen. Kun reaktorialtaan vesi on seisokin edetessä jäähtynyt riittävästi, voidaan TTKE:n mukaan käyttää jälkilämmön poistoon pelkästään järjestelmää 324. Järjestelmää 331 käytetään seisokin alussa apuna reaktorin jäähdytyksessä jäähdytyksen tehostamiseksi. [22]

Järjestelmä 321 koostuu kahdesta rinnakkaisesta pumpusta P1 ja P2 sekä rinnakkaisista lämmönvaihtimista E1 ja E2. Järjestelmästä 321 siirretään lämpöä sammutetun reaktorin välijäähdytysjärjestelmään 721, josta lämpöä siirrettään mereen sammutetun reaktorin merivesijärjestelmän 712 kautta. [22]

5.3.4 Järjestelmien erotukset

Huoltotöitä varten osa laitoksen järjestelmistä täytyy erottaa määräajaksi. Olkiluodossa erotustyöt tehdään käyttömääräimien mukaisesti. Käyttömääräimet laaditaan erikseen kullekin seisokin aikaiselle työvaiheelle. Käyttömääräimessä esitetään työn toteuttamiseen liittyvät toimenpiteet eri järjestelmissä. Yksittäisiä töitä ohjataan työlupajärjestelmällä.

5.3.5 Polttoaineen vaihto

Polttoaineen vaihdon valmistelut aloitetaan tyhjentämällä reaktoriallas vedestä, jonka jälkeen suojarakennuksen kupoli, reaktoritankin kansi, höyrynkuivain ja hidastintankin kansi irrotetaan ja nostetaan hallinosturilla niille varatuille paikoille. Uudet reaktoriin vaihdettavat polttoaineniput on jo ennen kannen avaamista tuotu valmiiksi polttoainealtaaseen. Polttoaineallas voidaan yhdistää reaktorialtaaseen ja siirtää uutta polttoainetta reaktoriin ja käytettyä polttoainetta pois reaktorista siten, että niput ovat jatkuvasti veden alla säteilysuojassa.

Polttoaineen vaihto suoritetaan ennalta tehdyn lataussuunnitelman mukaisesti. Vuosittain reaktoriin vaihdetaan noin neljännes uusia polttoainenippuja (120 – 140 kpl). Lisäksi suoritetaan polttoaineen sisäisiä siirtoja tasaisemman palaman ja tehojakauman saavuttamiseksi. Yhteensä polttoainesiirtoja tehdään 590 – 700. Käytöstä poistetut niput siirretään latauskoneella polttoainealtaaseen. Polttoainealtaassa nippujen annetaan

jäähtyä muutaman vuoden ajan, kunnes niiden jälkilämpöteho on laskenut riittävästi. Tämän jälkeen käytetyt niput kuljetaan polttoaineen siirtosäiliön avulla käytetyn polttoaineen välivarastoon odottamaan loppusijoitusta. [72]

Polttoaineen vaihdon valmistuttua suoritetaan reaktorin lopputarkastus, jossa todetaan reaktorin latauksen olevan suunnitelmien mukainen. Tämän jälkeen asennetaan reaktorin sisäosat ja reaktoripainesäiliön kansi takaisin paikoilleen, tyhjennetään reaktoriallas, asennetaan PS-kupoli ja täytetään allas uudestaan vedellä. [20, s. 20]

5.3.6 Ylösajo

Ennen reaktorin tekemistä globaalisti kriittiseksi tarkastetaan mittauksilla latauksen symmetrisyys ja sulkumarginaali. Sydänlaskujen tulokset tarkastetaan vähintään viidessä eri reaktorin kohdassa vetämällä säätösauvoja ulos sen verran, että reaktori ajautuu paikallisesti kriittiseksi. Hyväksytysti suoritettujen kokeiden jälkeen reaktori-insinööri antaa luvan saattaa reaktori globaalisti kriittiseksi ja aloittaa reaktorin lämmitys. [20, s. 21]

Reaktorin ylösajon alkuun kuuluvia toimenpiteitä ovat säätösauvojen ulosvedon aloittamisen lisäksi jälkilämmönpoiston kytkeminen pois päältä, reaktoriveden hapenpoisto sekä reaktorin pinnan säätö. Reaktorin paineen noustessa arvoon 6,7 MPa tehdään koestuksia ulospuhallusjärjestelmässä, tarkastetaan suojarakennus ja koestetaan ylähenkilösulun tiiveys. Tämän jälkeen aloitetaan suojarakennuksen typpitäyttö. Samalla testataan säätösauvojen toimintaa mittaamalla säätösauvojen sisäänmenoajat ja toimilaitteiden moottorien vaatimat tehot. [20, s. 22]

Käynnistys kuumavalmiudesta aloitetaan avaamalla reaktorin päähöyrylinjojen ulommat eristysventtiilit höyryputkien lämmitystä varten. Kun reaktorin ja höyryputkien välinen paine-ero on alle 6 %, ulommat höyrylinjojen eristysventtiilit suljetaan ja sisemmät avataan. Tämän jälkeen voidaan ottaa käyttöön höyrylinjat 1 ja 4. Lauhdutin voidaan ottaa käyttöön sen paineen laskiessa alle 0,005 MPa. Reaktorin painetta voidaan nyt säätää turbiinin ohitusventtiileillä. Kun reaktorin teho on n. 20 %,

voidaan turbiini ottaa käyttöön. Turbiinille ja generaattorille tehdään käyttöönottokokeet ja suoritetaan kytkentä verkkoon. Turbiinin korkeapainepesän säätöventtiilit alkavat säätää reaktorin painetta verkkoon kytkeytymisen jälkeen. Tehoa nostetaan vähitellen vetämällä säätösauvoja ulos sydämestä. Höyrylinjat 2 ja 3 otetaan käyttöön tehon ylittäessä 30 %. Tästä tehon korotusta jatketaan edelleen aina 100 % asti.[20, s. 22]

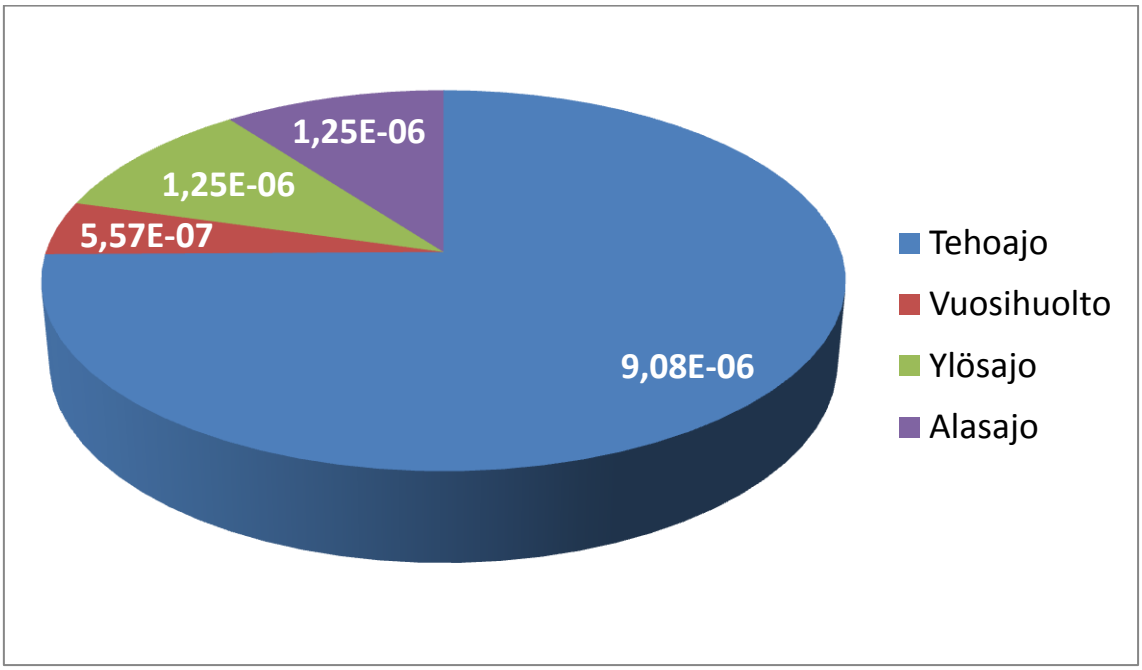
5.4 Seisokkitilojen PRA

Olkiluodon seisokkitilojen PRA:ssa käsitellään sydänvaurioon johtavia alkutapahtumia, eli PRA:n tasoa 1. Lisäksi siinä on kartoitettu tapahtumaketjuja, jotka eivät vaaranna laitoksen turvallisuutta, mutta voivat aiheuttaa merkittäviä taloudellisia vahinkoja. PRA:n luotettavuusmallit on laadittu FIN-PSA-ohjelmalla. Mallit perustuvat tehoajoa varten laadittuihin vikapuihin, joita on täydennetty muun muassa automatiikan ja käytettävissä olevien osajärjestelmien osalta seisokin eri vaiheita vastaaviksi. PRA:ssa on tehty jako tehoajon ja seisokin aikaisten alkutapahtumien välillä siten, että tehoajoon kuuluviksi luetaan alkutapahtumat, jossa reaktorin paine on yli 1,2 MPa. Vastaavasti seisokin aikaisiksi luetaan kuuluviksi alkutapahtumat, joissa paine on tätä pienempi. [53, s. 1-2]

Kaikkien seisokkitilojen yhteenlasketuksi sydänvauriotaajuudeksi on arvioitu $5{,}57 \cdot 10^{-7}$/a, joka on 4,6 % kokonaissydänvauriotaajuudesta $1{,}21 \cdot 10^{-5}$/a. Eri käyttötilojen sydänvauriotaajuudet on esitetty taulukossa 7 ja kuvassa 3. [53, s. 6]

Taulukko 7. Sydänvauriotaajuuden jakautumien käyttötiloittain. [53, s. 6]

Käyttötila	CDF(1/a)	%
Tehoajo	9,08E-06	74,8
Vuosihuolto	5,57E-07	4,6
Ylösajo	1,25E-06	10,3
Alasajo	1,25E-06	10,3
Yhteensä	1,21E-05	100



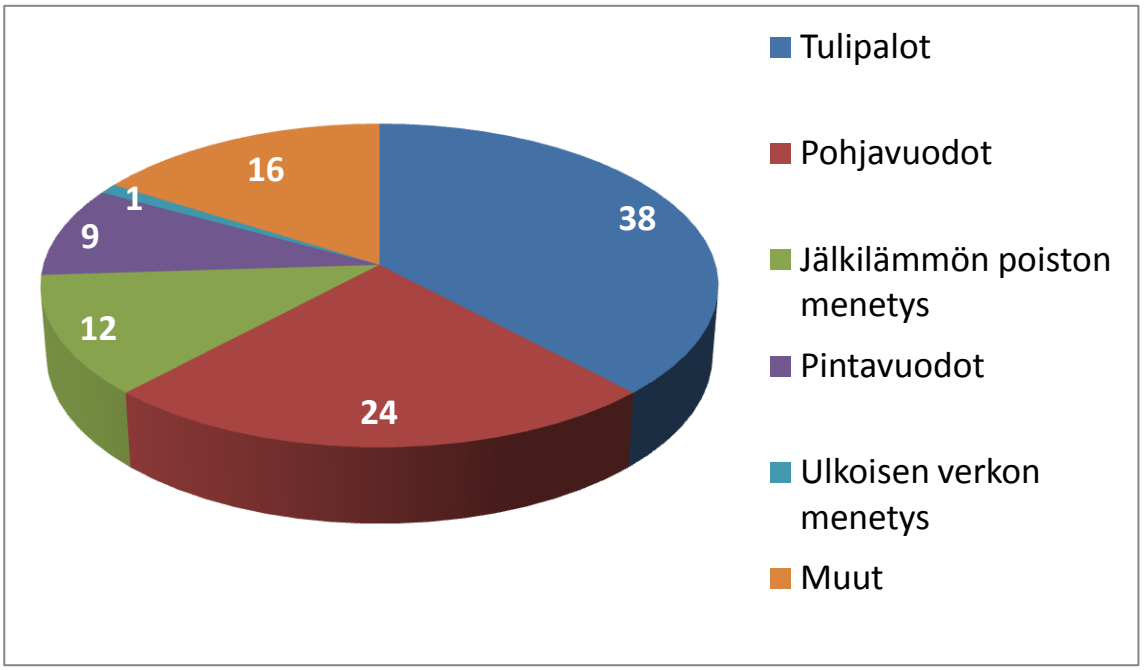
Kuva 3. Sydänvauriotaajuuden jakaantuminen käyttötiloittain.

Pelkän vuosihuollon sydänvauriotaajuuden osuus on verraten pieni (4,6 %). Kuitenkin, jos seisokkiin lasketaan mukaan niihin läheisesti liittyvät suunniteltu alasajo (10,3 %) ja ylösajo (10,3 %), saadaan seisokkitilojen sydänvauriotaajuuden osuudeksi 25,2 % koko sydänvauriotaajuudesta, eli karkeasti noin neljännes sydänvauriotaajuudesta olisi seisokin aikaista ja kolme neljäsosaa tehoajon aikaista.

TVO on jakanut sydänvaurioon mahdollisesti johtavat seisokin aikaiset alkutapahtumat kahteen pääluokkaan: vuotoalkutapahtumat ja jälkilämmön poiston menetykset. Tässä jaottelussa tulipalot ja ulkoisen sähköverkon menetykset sisältyvät jälkilämmön poiston menetys- alkutapahtumaan. Tulipalot voidaan kuitenkin esittää myös omana alkutapahtumaryhmänään. Eri seisokkialkutapahtumien osuudet seisokin aikaisesta sydänvauriotaajuudesta (tulipalot erillisenä ryhmänä) ovat esillä taulukossa 8 ja kuvassa 6**.** [53, s. 48-49]

Taulukko 8. Seisokin aikaiset alkutapahtumat. [53, s. 48-49]

Alkutapahtuma	%
Tulipalot	38
Pohjavuodot	24
Jälkilämmön poiston menetys	12
Pintavuodot	9
Ulkoisen verkon menetys	1
Muut alkutapahtumat	16



Kuva 4. Seisokin aikaisen sydänvauriotaajuuden jakautuminen alkutapahtumittain.

5.4.1 Tulipalot

Tulipalot muodostavat suurimman sydänvaurioriskin seisokin aikana, niiden osuuden sydänvauriotaajuudesta ollessa 38 %. Tulipalojen aiheuttama riski perustuu siihen, että ne voivat aiheuttaa turvallisuusjärjestelmien menetyksen. Järjestelmän menetyksen syy paloalkutapahtumassa voi olla tärkeiden kaapeleiden vaurioituminen, suojaustoiminnon käynnistyminen tai palavan tilan tekeminen jännitteettömäksi sammutustyötä varten. [53, s. 47] [54, s. 14]

Olkiluodon laitosyksiköille on ominaista, että niissä on huomattava määrä huonetiloja, noin 1500 kpl yksikköä kohden. Suurin osa huonetiloista on verraten pieniä. Turvallisuuden kannalta tärkeät laitteet on pyritty sijoittamaan huoneisiin, jossa ei sijaitse muita laitteita. Huoneet on lähes poikkeuksetta varustettu paksuilla betoniseinillä ja palo-ovilla, mikä estää tehokkaasti palon leviämisen huoneesta toiseen. Siinä missä huoneiden suuri määrä parantaa turvallisuutta, se toisaalta myös vaikeuttaa tarkkojen paloturvallisuusanalyysien tekemistä, koska yksittäisen huoneen turvallisuusmerkityksen arviointi vaikeutuu. [79, s. 8-10]

Seisokin aikaisiin paloriskeihin luetaan palot, joiden seurauksena reaktorin jälkilämmön poisto menetetään, tai jotka vaikuttavat merkittävästi johonkin turvallisuustoimintoon. Palotaajuuksien määritys perustuu NUREG/CR-6850-ohjeeseen. Riskin kannalta tärkeimmät alkutapahtumat ovat palot 321- ja 324-järjestelmiin liittyvissä AC- tai BD-osajärjestelmien kaapelitiloissa. [79, s. 11]

Seisokin aikainen paloriski eroaa tehoajon aikaisesta siinä mielessä, että laitoksella olevien ihmisten ja tehtävien töiden määrät ovat oleellisesti suuremmat. Tästä syystä seisokkien aikana tulipalot ovat yleisempiä kuin tehoajon aikana. Lisääntyneen paloriskin vuoksi vuosihuoltojen aikana voimalaitoksen oman palokunnan lisäksi paloturvallisuutta valvomaan on palkattu ulkopuolista työvoimaa toimimaan palovartijoina. [79, s. 14]

5.4.2 **Vuodot**

Toiseksi suurimman seisokin aikaisen riskin aiheuttavat jäähdytteen menetykseen johtavat vuodot. Vuotoalkutapahtumat on jaettu vuodon sijainnin mukaan pohjavuotoihin (sydämen alapuoliset vuodot) ja pintavuotoihin (sydämen yläpuoliset vuodot). Pohjavuotojen osuus seisokin sydänvauriotaajuudesta on 27,4 %. ja pintavuotojen 9,3 %. [53, s. 48-49]

Merkittävimmät vuodot liittyvät reaktorin painesäiliöön ja sen läpivienteihin. Pohjavuodoista merkittävin on vuoto pääkiertopumpun yhteestä. Muita mahdollisia

kohteita pohjavuodoille ovat säätösauvojen läpiviennit, neutronivuon mittausjärjestelmä ja reaktoripainesäiliön instrumentoinnit. Pintavuodoista mahdollisia ovat muun muassa reaktorihallin altaiden teräsverhouksen tai PS-tiivisteen vuoto sekä useiden järjestelmien reaktoripainesäiliön putkiyhteet (311-, 312-, 314-, 321-, 323-, 324-, 326-, 336- ja 351-järjestelmät). [20, s. 52-63]

Vuotoalkutapahtumiin johtaviksi syiksi on tunnistettu teknisiä syitä sekä käyttö- ja kunnossapitotöihin liittyviä syitä. Teknisistä syistä mahdollisiksi on tunnistettu raskaan taakan putoamisesta sekä pitkään jatkuneesta mekaanisesta kulumisesta aiheutuvia vuotoja. Pitkään jatkuvan mekaanisen kulumisen huomaamatta jäämistä pidetään kuitenkin erittäin epätodennäköisenä. Käyttö- ja kunnossapitotöistä aiheutuville alkutapahtumille on tunnistettu vain inhimillisistä tekijöistä aiheutuvia syitä. [20, s. 24-29]

5.4.3 Jälkilämmönpoiston menetykset

Jälkilämmönpoiston menetys- alkutapahtumiin luokitellaan tapahtumat, joissa menetetään 321- ja 324-järjestelmät. Jälkilämmön poiston menetys -alkutapahtumiin voidaan lukea kuuluviksi myös ulkoisen sähköverkon menetys ja osa paloalkutapahtumista. Nämä mukaan luettuna jälkilämmön poiston menetys vastaa 22,7 % koko sydänvauriotaajuudesta. Jälkilämmön poiston menetys omana alkutapahtumaan (ilman ulkoisen sähköverkon menetystä ja tulipaloja) vastaa 12 % koko sydänvauriotaajuudesta. TVO on arvioinut Bayesin menetelmällä kaikkien jälkilämmönpoistotilojen yhteenlasketun alkutapahtumataajuuden olevan noin 0,01/revisio. [20, s. 31] [53, s. 48]

Jälkilämmön poiston menetykseen johtavista alkutapahtumista merkittävimmät ovat niin sanotut yhteisvika-alkutapahtumat. Näihin luetaan 321- ja 324-järjestelmien tai niiden yhteisten tukijärjestelmien samanaikainen vikaantuminen. Todennäköisimpinä yhteisvika-alkutapahtumina pidetään yksittäisvikaa tai yksittäisvikaa ja sen kanssa samanaikaista toisen järjestelmän huoltoa. [20, s. 37]

Toinen mahdollinen jälkilämmön poiston menetykseen johtava alkutapahtuma on ulkoisen sähköverkon menetys. Tässä alkutapahtumassa menetetään ulkoiset 400 kV:n ja 110 kV:n sähköverkot pitkäksi aikaa, minkä seurauksena jälkilämmön poisto menetetään. Tällaisen häiriön taajuudeksi on arvioitu $2{,}7 \cdot 10^{-2}$/a. [20, s. 39-40]

5.4.4 Kylmänä paineistuminen

Reaktoripainesäiliön paineistuminen kylmänä yli 9,3 MPa paineeseen voi johtaa painesäiliön eheyden menetykseen. Tällaiselle alkutapahtumalle on tunnistettu kaksi mahdollista alkutilaa: alasajon lopulla vesitäytön jälkeen ja ylösajon valmistelu kylmäseisokin aikana. Reaktorin paineistuminen näissä tiloissa edellyttää korkeapaineisen pumpun virheellistä käynnistymistä ja pitkäkestoista veden pumppausta reaktoriin. Reaktorin kylmänä paineistuminen voi aiheutua myös jälkilämmön poiston menetyksen seurauksena jälkilämmön paisuttaessa vettä. Ylipaineistumista yli 9 MPa paineeseen pidetään hyvin epätodennäköisenä; sen syntyminen edellyttää useiden paineensuojausjärjestelmien samanaikaista käyttökunnottomuutta. Sen taajuudeksi on arvioitu $1 \cdot 10^{-11}$/a. [20, s. 40-47]

5.4.5 Paikallinen kriittisyys

Kiehutusvesireaktorissa kylmän seisokin aikainen laaja reaktiivisuusonnettomuus on erittäin epätodennäköinen, koska alikriittisyyden varmistukseen ei käytetä booria. Lisäksi käytetyt turvamarginaalit ovat niin suuret, että yksittäisen säätösauvan putoaminen sydämestä ei riitä aikaansaamaan uudelleen kriittisyyttä. Paikallisen kriittisyyden syntyminen vaatii vähintään kahden vierekkäisen säätösauvan poistoa tai latausvirhettä, jossa tuoretta polttoainetta tuodaan paikkaan, josta puuttuu tai vedetään ylös yksi säätösauva. [20, s. 47-48]

Todennäköisyyspohjaisen turvallisuusarvioinnin perusteella paikallisen kriittisyyden todennäköisyydeksi on arvioitu $1{,}8 \cdot 10^{-5}$/seisokki. Tärkein alkutapahtuma on kahden vierekkäisen säätösauvan poistuminen sydämestä. Tahattoman kerkeän kriittisyyden todennäköisyys on n. $1 \cdot 10^{-9}$/seisokki. [20, s. 47-48]

Ainoastaan kerkeän paikallisen kriittisyyden voidaan katsoa vaarantavan polttoaineen ja sen suojakuoren eheyden. Mikäli kriittisyys ei nouse kerkeälle tasolle, on seurauksena ainoastaan äkillinen lämpötilapiikki, mikä Doppler-ilmiön seurauksena nopeasti stabiloituu. [20, s. 47-48]

5.4.6 Raskaat nostot

Seisokin aikana joudutaan tekemään runsaasti raskaita nostoja. Jokaiseen nostoon sisältyy riski taakan putoamisesta. Seisokin aikaisten riskien kannalta avainasemassa ovat reaktorihallissa tehtävät nostot. Sydämen yläpuolisen vuodon aiheuttavalle taakan putoamiselle on tunnistettu kaksi mahdollista alkutapahtumaa:

- Raskaan komponentin putoaminen reaktorin laipalle siten, että sydämen yläpuolinen putkiyhde murtuu
- Raskaan komponentin putoaminen PS-tiivisteen päälle siten, että tiiviste murtuu [20, s. 48-52]

Käytännössä ainoa komponentti, jonka putoaminen voisi aiheuttaa putkiyhteen murtumisen, on reaktoripainesäiliön kansi. PS-tiivisteen oletetaan voivan murtua myös hidastintankin kannen, höyrynerottimen tai hidastintankin kannen nostotyökalun tippuessa. Reaktorin kannen putoamiselle on arvioitu taajuudeksi $2 \cdot 10^{-4}$/seisokki. Noin 5 % kannen putoamisista arvioidaan johtavan putkiyhteen murtumiseen. PS-tiivisteen vaurioitumisen taajuudeksi on arvioitu $1 \cdot 10^{-5}$/seisokki. [20, s. 48-52]

Polttoainenipun tai säätösauvan putoamisen ei ole tunnistettu aiheuttavan sydänvaurioon johtavaa alkutapahtumaa. Näissä tapahtumissa on kuitenkin riski suuriin taloudellisiin menetyksiin sekä säteilyannoksien nousuun. [20, s. 48-52]

5.5 Seisokkitilojen FSAR-analyysit

Olkiluodon FSAR käsittelee varsin niukkasanaisesti seisokin aikaisia tapahtumia. Tähän vaikuttaa suurelta osin se, että monet myös seisokin aikana mahdolliset alkutapahtumat, kuten jäähdytteen menetys tai sähkön menetys, on analysoitu tehoajon alkutapahtumina,

jolloin niiden aiheuttamaa riskiä pidetään reaktorin tilan vuoksi suurempana kuin seisokin aikana.

Seisokin aikaisista alkutapahtumista FSAR:issa on analysoitu:

- Jäähdytteen vuoto pääkiertopumpun yhteestä
- Jälkilämmön poiston menetys
- Järjestelmän 721 menetys polttoaineenvaihdon aikana
- Säätösauvan putoaminen
- Polttoaineen ja säätösauvojen virheellinen käsittely
- Jäähdytysvesikanavan tukkeuma

5.5.1 Jäähdytteen vuoto pääkiertopumpun yhteestä

Reaktoripainesäiliön pohjalla sijaitsevan pääkiertopumpun yhteestä tapahtuva vuoto on mahdollinen ainoastaan seisokin aikana, jolloin pääkiertopumppua huolletaan. Vuoto voi tapahtua, mikäli pääkiertopumpun akselin tiivistelaippa irtoaa inhimillisen virheen vuoksi. Tällaisen vuodon todennäköisyydeksi on arvioitu $3{,}5 \cdot 10^{-7}$/a, minkä perusteella se luokitellaan oletettujen onnettomuuksien laajennuksiin kuuluvaksi tapahtumaksi. [34]

Analyysissa oletetaan, että pääkiertopumpun akselin tiivistelaippa irtoaa reaktorihallin altaiden välisten porttien ollessa kiinni, jolloin jäähdytteen tilavuus sydämen yläpuolella on pienin mahdollinen. Ilman operaattoritoimenpiteitä vedenpinta laskee tällöin sydämen yläreunan tasolle noin 27 minuutissa. Sydän paljastuu noin 32 minuutin kohdalla ja alkaa sulaa 45 minuutin kohdalla. [34]

Tällaisessa onnettomuudessa on operaattoreiden varmistettava, että reaktoriin saadaan syötettyä riittävästi vettä pitämään reaktorisydän veden peitossa sekä poistettava reaktorissa kehittyvä jälkilämpö. TTKE:n mukaan pääkiertopumppuja huollettaessa tulee vähintään yhden 327- ja kolmen 323-piirin olla käyttökunnossa. Tämän lisäksi palovesijärjestelmän 861 tulee olla käyttökunnossa. Suojarakennuksen alemman

henkilösulun tulee olla kiinni. Operaattoreiden toimenpiteet pohjautuvat hätätilanneohjeeseen *Reaktoripaineastian pohjavuoto polttoaineenvaihtoseisokissa*. [34]

Operaattorien toimenpiteet tehdään seuraavassa järjestyksessä:

- Alemman kuivatilan oven sulkeminen
- 323-pumppujen käynnistys
- Reaktorialtaan 733-täytön aloitus
- Palovesiletkujen selvittäminen ja venttiilien avaaminen [34]

Alemman kuivatilan tulvittamiseksi välitason tasalle (+25 m) tarvitaan vettä n. 1500 m^3. Reaktorissa on vettä sydämen yläpuolella vain 1130 m^3, joten vettä tulee syöttää myös 323-järjestelmästä sekä käytettävistä olevista palovesilinjoista. Jotta sydämen sulaminen saataisiin estettyä, tulisi veden pumppaus aloittaa viimeistään 4 minuutin kuluttua vuodon synnystä, mikäli käytössä on vain yksi 323-linja. Jos käytössä on kolme 323-linjaa, on aikaa pumppujen käynnistämiseen 13 minuuttia. Märkätilan ovi on suljettava viimeistään 25 minuutin kuluttua vuodosta; muuten vesi alkaisi virrata sinne, eikä pumppujen tuotto riittäisi enää pitämään sydäntä peitettynä. Mikäli alempi kuivatila saadaan onnistuneesti tulvitettua +25 m- tasolle, tarvitaan vain 230 kg/s jäähdytevirtaus pitämään vedenpinta reaktorin sydämen tasalla. Vuodon korjaamisen mahdollistamiseksi koko suojarakennus tulisi tulvittaa. [34]

5.5.2 Jälkilämmön poiston menetys

FSAR:issa on analysoitu tilanne, jossa seisokin aikana menetetään molemmat tavanomaiset jälkilämmönpoistojärjestelmät 321 ja 324. FSAR:issa esitetään tämän varalta kolme vaihtoehtoista tapaa poistaa jälkilämpöä. [35]

Yksi mahdollisuus on käyttää hyväksi rakennusten lämmitysjärjestelmää 763. Sen kautta voidaan poistaa lämpöä jäähdytysketjulla 321-331-763-714. Tätä kautta on mahdollista jäähdyttää 23 MW teholla. [35]

Toinen vaihtoehto jäähdyttää reaktoria on poistaa höyryä reaktorista lauhdutusaltaaseen ulospuhallusjärjestelmällä 314. Reaktoriin saadaan tällöin syötettyä lisää vettä reaktorisydämen ruiskutusjärjestelmällä 323. Tällöin lauhdutusallasta jäähdytettäisiin jäähdytysketjulla 322-721-712. [35]

Mikäli edellä mainittu lämmönsiirtoketju ei ole käytettävissä, voidaan myös lauhdutusaltaan vettä keittää ja poistaa syntynyt höyry suojarakennuksen paineenalennusjärjestelmällä 362. [35]

5.5.3 Järjestelmän 721 menetys polttoaineenvaihdon aikana

Sammutetun reaktorin välijäähdytysjärjestelmällä 721 jäähdytetään seisokin aikana 321- ja 324-järjestelmiä. Tässä analyysissa oletetaan, että yhteisvika-alkutapahtuman vuoksi 721-järjestelmä menetetään täydellisesti. [33]

Vaihtoehtoinen tapa poistaa jälkilämpöä reaktorista on käyttää lämmönsiirtoketjua 324-723-713. Tällä tavoin saadaan huomattavasti hidastettua reaktorialtaan veden lämpenemistä; mikäli 721-järjestelmä menetetään samalla hetkellä kun reaktorikansi avataan, kestää 30 tuntia, ennen kuin vesi reaktorialtaassa alkaa kiehua. Reaktorialtaan on analysoitu kestävän veden kiehumisen. Kiehuminen kestää noin 180 tuntia, kunnes jälkilämpöteho on laskenut niin alas, että 324-järjestelmän jäähdytys riittää. Kiehumisesta syntyvä höyry suodatetaan ja poistetaan ilmanvaihtojärjestelmän 749 kautta. 749-järjestelmää ei ole suunniteltu kuuman höyryn suodattamiseen, ja on todennäköistä, että järjestelmä pettää viimeistään muutaman päivän kuluttua. Tällöin ainoa jäljelle oleva tapa poistaa höyryä on avata reaktorihallin seinässä olevat suurten komponenttien kuljetusluukut, ja poistaa höyryä ulos niiden kautta. Radioaktiivisten päästöjen arvioidaan olevan vähäiset, koska polttoaineen ei oleteta vaurioituvan. Uutta vettä kiehuneen tilalle voidaan syöttää täyssuolanpoistetun veden jakelujärjestelmästä 733 tai palovesijärjestelmästä 861. [33]

5.5.4 Säätösauvan putoaminen

Analysoitavan tapahtuman lähtötilana on vuosihuollon loppuvaiheille sijoittuva ylösajon valmistelu. Yksittäisen säätösauvan oletetaan putoavan reaktorista viallisen toimilaitteen mukana.[47]

Tapahtuma aiheuttaa välittömästi paikallisen reaktiivisuuden kasvun. Reaktorin oletetaan saavuttavan paikallisesti kerkeän ylikriittisyyden, josta aiheutuu välittömästi pikasulku. Pikasulku toteutetaan siirtämällä kaikki säätösauvat täysin sisälle reaktorisydämeen, mikä aiheuttaa välittömästi ketjureaktion sammumisen. [47]

Tapahtuman vakavuus on suoraan riippuvainen sauvan tippumisen aiheuttamasta paikallisen reaktiivisuuden kasvusta. Mikäli reaktiivisuuden nousu ylittää kerkeän kriittisyyden rajan, kasvaa polttoaineen lämpötila aluksi hyvin nopeasti, kunnes Doppler-takaisinkytkentä kääntää lämpötilan laskun. Nopea lämpötilan nousu aiheuttaa jäähdytteen höyrystymistä, josta aiheutuu paineen nousua reaktorissa. Höyryn määrän kasvu lisää toisaalta myös aukko-osuutta, mikä vaikuttaa alentavasti reaktiivisuuteen. [47]

Reaktiivisuuden kasvun vaikutusta polttoainesauvojen eheyteen on analysoitu 3D-transienttien laskentaan kehitetyllä RAMONA-laskentakoodilla. Tapahtuma on analysoitu kolmella erilaisella variaatiolla:

- Case 1: Perustilanne, jossa yksi säätösauva putoaa ja aiheuttaa reaktiivisuuden kasvua viereisissä polttoainesauvoissa
- Case 2: Muuten sama kuin Case 1, mutta yksi säätösauvan viereisistä polttoainenipuista on vaihdettu palamaltaan korkeampaan nippuun (34,4 MWd/kgU nippu korvattu 46,4 MWd/kgU)
- Case 3: Muuten sama kuin Case 2, mutta korvaavan nipun palama on 49,9 MWd/kgU [47]

Case 1:ssä kerkeä kriittisyys saavutetaan 0,5 sekunnin kuluttua säätösauvan tippumisen alkamisesta. Säätösauva on tällöin tippunut 0,925 metriä. Reaktiivisuuden äkillinen

nousu kääntyy Doppler-takaisinkytkennän ja aukko-osuuden kasvun johdosta laskuun 0,8 sekunnin kohdalla. Reaktiivisuus laskee tällöin arvosta 1000 pcm arvoon 400 pcm. Polttoainenipun teho kasvaa suurimmillaan noin viisinkertaiseksi nimellistehoon verrattuna ennen takaisinkytkennän vaikutusta. Takaisinkytkennän myötä nipun teho laskee hetkellisesti 0,2 kertaiseksi nimellistehoon nähden. Suurimmillaan polttoaineen lämpötila on 987 °C. Reaktori saa pikasulkusignaalin ajassa 0,75 sekuntia. Säätösauvojen sisäänajossa kestää kuitenkin sen verran kauan, että reaktori on ajettu lopullisesti alas ajassa 4 - 5 sekuntia. Analyysin mukaan polttoaineen maksimi entalpia on 373 kJ/kg, joka on alle hyväksymisrajan. [47]

Variaatioiden Case 2 ja Case 3 tarkoituksena on selvittää, miten korkeampipalamainen nippu käyttäytyy tilanteessa, jossa reaktiivisuus äkillisesti nousee. Case 2 ja Case 3 tapahtumat etenevät vastaavasti kuin Case 1:ssä. Suurin entalpia ja lämpötila polttoaineessa on Case 2:ssa, jossa saavutetaan arvot 1096 °C ja 471 kJ/kg. Case 3:ssa arvot vain hivenen suuremmat kuin Case 1:ssä, 1016 °C ja 381 kJ/kg. Myös näissä tilanteissa hyväksymiskriteerit täyttyvät. [47]

5.5.5 Jäähdytysvesikanavan tukkeuma

FSAR:in järjestelmäkohtaisessa osassa käsitellään tilannetta, jossa jäähdytysvesikanavan tulopuoli tukkeutuu kokonaan tai osittain. Tukkeutumisen voi aiheuttaa jäästä syntyvä suppo tai tulovesitunnelin romahtaminen. Mikäli jäähdytysveden otto on edelleen käytettävissä, voidaan meriveden otto kääntää poistopuolelle ja ohjata poistovesi ulos jäähdytysvesirakennusten ovien kautta. [19]

5.6 Seisokkitilojen TTKE

Olkiluodon TTKE on jaettu käyttötiloittain kahteen ryhmään reaktorin lämpötilan perusteella: kuumiin ja kylmiin tiloihin. Kuumien tilojen ryhmään kuuluvat käyttötilat 2,3,4 ja 5 (kuuma sammutettu reaktori, ydinlämmitys, kuumavalmius, tehoajo). Kylmien tilojen ryhmään kuuluvat käyttötilat 1 ja 7 (kylmä sammutettu reaktori,

polttoaineenvaihto). Tässä luvussa tarkastellaan kylmille tiloille TTKE:ssa asetettuja käyttöehtoja ja rajoituksia.

5.6.1 Reaktiivisuuden säätö

Kylmissä seisokkitiloissa säätösauvojen ulosvetäminen on kielletty, mikäli ruuvipysäytys- ja pikasulkutoiminto ovat epäkunnossa eikä epäkuntoisten säätösauvojen toimilaitteiden ajomoottorin sulakkeita ole poistettu. [67]

Sulkumarginaalin on oltava kaikissa tilanteissa vähintään 0,5 % + korjaustermi, jonka arvo riippuu polttoaineen palamasta ja ksenonkonsentraatiosta. [67]

Mikäli säätösauvojen asennonosoitusjärjestelmä on epäkunnossa, säätösauvojen tulee olla kokonaan ajettuina reaktorisydämeen. Kuitenkin säätösauvan saa säätösauvatoimilaitehuollon aikana ottaa väliaikaisesti ulos sydämestä, vaikka asennonosoitusjärjestelmä ei tällöin ole käytettävissä. [67]

5.6.2 Sydämen jäähdytys

TTKE:n luvun 7.4 tarkoituksena on taata riittävä jäähdytyskapasiteetti primäärijärjestelmässä tapahtuvan jäähdytevuodon tai jälkijäähdytyksen menetyksen varalle. [68]

Kun kylmän seisokkitilan aikana reaktorissa on käytettyä polttoainetta, tulee vähintään yhden 327- tai 323-piirin olla käyttökunnossa. Mikäli lauhdutusaltaan pinnankorkeus on alle 11,20 m, tulee vähintään kahden 327-piirin olla käyttökunnossa. Reaktoripainesäiliön kannen olleessa paikallaan tai kannen ollessa auki, mutta reaktorialtaan ollessa vajaa, tulee eri 662-kiskosta sähkönsä saavista järjestelmistä 327- ja/tai 323-piireistä vähintään kahden olla käyttökunnossa. [68]

Jos työtä suoritetaan sydämen ylätason alapuolella sellaisessa paikassa, jota ei voida eristää reaktoripainesäiliöstä, tulee vähintään yhden 327-piirin ja vähintään kahden 323-piirin olla käyttökunnossa. Jos työtä suoritetaan pääkiertopumpuilla ja

reaktoripaineastian tiiviys on ainoastaan juoksupyörän tilalle asennetun tulpan varassa, tulee vähintään kolmen 323-piirin olla käyttökunnossa. [68]

5.6.3 Lauhdutusallas

Laitoksen ollessa kylmässä seisokkitilassa tulee veden pinnan korkeuden lauhdutusaltaassa olla yli 11,20 m. Reaktorikannen ollessa auki, voidaan pintaa laskea tasolle 8,60 m. [69]

Lauhdutusaltaan saa tyhjentää kokonaan vedestä, mikäli kaikki polttoaineniput on poistettu reaktorista, tai mikäli kaikki seuraavat ehdot täyttyvät:

- Reaktoripainesäiliön kannen tulee olla pois paikaltaan ja sekä reaktorialtaan että molempien reaktorin sisäosien säilytysaltaiden tulee olla täynnä.
- Järjestelmien 321 ja 324 sekä vähintään kahden piirin järjestelmässä 327 tulee olla käyttökunnossa.
- Henkilösulun alemman kuivatilan ja reaktorirakennuksen välillä tulee olla kiinni.
- Reaktoritankkiin välittömässä yhteydessä olevien suurien komponenttien, kuten pääkiertopumpun akselin tai säätösauvojen toimilaitteiden, parissa ei saa olla käynnissä mitään huoltotöitä. [69]

5.6.4 Jälkilämmön poisto

Kylmien seisokkitilojen aikana molempien 321-721-712-jäähdytysketjujen jäähdytystoiminnan tulee olla käyttökunnossa. Toinen 321-järjestelmän piireistä voidaan tarkoituksella saattaa epäkuntoon huollon ajaksi, mikäli jompikumpi seuraavista ehdoista täyttyy:

- Reaktorikannen ollessa kiinni tulee 314- järjestelmän ja kahden 322- ja 327-piirin olla käyttökunnossa. Tällöin on lisäksi primääripiirin oltava tiivis ja reaktoripaineastian veden pinnankorkeuden alle tason H2. Jälkilämmönpoiston tulee voida tapahtua järjestelmien 321 ja 331 osien kautta.

- Reaktorikannen ollessa auki, tulee reaktorialtaan olla täynnä vettä ja jälkilämmön poistoon pystyä käyttämään 324-järjestelmää sekä 321-järjestelmän käyttökuntoista piiriä ottaen huomioon yksittäisen aktiivisen komponentin vikaantumisen mahdollisuus. [71]

324-järjestelmän tulee olla käyttökunnossa aina reaktorin kannen ollessa auki ja silloin kun polttoaine- tai reaktorialtaissa on käytettyä polttoainetta. 324-järjestelmän saa tarkoituksellisesti saattaa epäkuntoon, mikäli jälkilämmön poisto voidaan suorittaa järjestelmällä 321 ja mahdollisesti järjestelmän 324 käyttökunnossa olevalla osalla ottaen huomioon yksittäisen aktiivisen vikaantumisen mahdollisuus. [71]

Järjestelmän 314 paineensäätötoiminnan tulee olla käyttökunnossa, jos reaktoripaineastian kansi on paikallaan, eivätkä molemmat jäähdytysketjut 321-721-712 ole käyttökunnossa. Tällöin on lisäksi primääripiirin oltava tiivis ja reaktoripaineastian veden pinnankorkeuden on alitettava raja H2. [71]

Järjestelmästä 327 vähintään kahden piirin ja vähintään kahden 322-721-712 jäähdytysketjun tulee olla siinä käyttökunnossa, että niitä voidaan tarvittaessa käyttää jälkilämmön poistoon. [71]

5.6.5 Sähkövoiman syöttö

Kylmien seisokkitilojen aikana laitoksen sähkönsyöttölaitteiston kapasiteetin tulee olla riittävä laitoksen pitämiseksi turvallisessa tilassa. [70]

Vähintään kahden dieselgeneraattorin apujärjestelmineen tulee olla käyttökunnossa siten, että ne pystyvät toimittamaan sähköä järjestelmille, joihin kohdistuu käyttökuntoisuusvaatimuksia. Huollon ajaksi saa tarkoituksellisesti saattaa käyttökunnottomaksi enintään yhden dieselgeneraattorin kerrallaan. [70]

Kytkinlaitosten ja tasajännitejärjestelmien tulee olla käyttökunnossa siten, että kaikki ne laitteet, jotka käynnistysautomatiikan mukaisesti saavat sähkönsyöttönsä käyttökuntoisista varavoimanlähteistä, voivat saada jännitteensä näistä lähteistä. [70]

Vähintään yhden 400 kV:n tai 110 kV:n sähkönsyöttölinjan tulee pystyä syöttämään sähköä niille laitoksen dieselvarmistetuille 660 V:n kiskoille (järjestelmä 662), jotka saavat sähkönsyöttönsä käyttökuntoisista dieselgeneraattoreista. [70]

5.6.6 Sydänmuutokset

Ladattaessa sydämeen tuoretta polttoainetta tai tehtäessä sisäisiä polttoainesiirtoja tulee kaikkien säätösauvojen olla kokonaan sisällä reaktorisydämessä. [65]

Säätösauvoja voidaan vetää ulos reaktorisydämestä toimilaitehuollon ajaksi, jos reaktori on mekaanisilla esteillä jaettu kahteen puoliskoon siten, että latauskonetta ei pysty ajamaan sillä puoliskolla, jossa säätösauvoja on irti**.** Tällöinkin vain yksi säätösauva saa kerrallaan olla ulosvedettynä sydämestä. [65]

Tuoreen polttoaineen latauksen ja sisäisten polttoainesiirtojen jälkeen voidaan säätösauvan toimilaitehuoltoja tehdä, jos mittauksin pystytään osoittamaan reaktorin olevan varmasti alikriittinen. [65]

5.6.7 Raskaat nostot ja kuljetukset reaktorirakennuksessa

Avoimen reaktorin yläpuolella saa käsitellä vain sellaisia komponentteja, joiden käsitteleminen on välttämätöntä, kuten reaktorin kansi ja sisäosat. Polttoainealtaiden yläpuolella saa käsitellä vain sellaisia komponentteja, joiden paino on alle 1000 kg. [76]

Reaktorihallin nosturin ja kaikkien siihen kuuluvien osien, turvallisuusjärjestelmien ja lukitusten tulee olla käyttökunnossa ennen nostojen aloittamista. Reaktorin suojarakennuksen kupolin, reaktorin painesäiliön kannen ja reaktorin sisäosien käsittelyssä saa käyttää vain tarkoitukseen varattuja nostotyökaluja**.** Nosturin kuljettajalla tulee lisäksi nostojen aikana olla joko puhelinyhteys nostojohtajan kanssa tai on käytettävä muita hyväksyttäviä merkinantotapoja. [76]

5.6.8 Palosuojelu

TTKE:ssa vaaditaan, että kylmien seisokkitilojen aikana palosuojelujärjestelmien toimintavalmius ja rakenteellinen palosuojaus on oltava sillä tasolla, että mahdollinen palo havaitaan nopeasti ja voidaan sammuttaa tehokkaasti sekä rajoitetaan palon leviäminen laitoksen ydinturvallisuuden varmentamiseksi. [66]

Palosuojattujen osastojen on oltava eheitä eikä niissä saa olla tarpeetonta palokuormaa. Epäkunnossa olevat palojärjestelmän osat tulee viipymättä saattaa takaisin käyttökuntoon ja tarvittaessa on vaadittava paloturvallisuustaso ylläpidettävä väliaikaisilla järjestelyillä. Samoin toimitaan, jos jokin palojärjestelmän osa halutaan tietoisesti saattaa epäkuntoon. [66]

Mikäli jonkin palo-osaston palokuorman todetaan ylittävän suunnitteluperusteissa määritellyn palokuorman, on palosuojelutoimia siellä tehostettava, kunnes tilanne palautuu normaaliksi. Poikkeamista, kuten avonaisista palo-ovista ja väärin tehdyistä läpivienneistä, on raportoitava. [66]

5.7 Häiriö- ja hätätilanneohjeet

Seuraavista seisokin aikaisista tapahtumista on laadittu häiriö- tai hätätilanneohjeet. Näiden lisäksi on olemassa ohjeita, jolle alkutilaa ei ole erikseen määritetty, mutta joita voidaan käyttää myös seisokkitiloille.

- Hätätilanneohje: Sähkön menetys
- Häiriöohje: Järjestelmien 321 ja 324 jäähdytystoiminnan samanaikainen menetys polttoaineenvaihdon aikana
- Häiriöohje: Järjestelmän 321 toiminnan menetys polttoaineenvaihdon aikana
- Häiriöohje: Reaktoripaineastian pohjavuoto polttoaineenvaihtoseisokissa
- Häiriöohje: Instrumenttiputken murtuma tietyissä huonetiloissa
- Häiriöohje: Onnettomuudet polttoaineen käsittelyn yhteydessä
- Häiriöohje: Jäähdytyskanavan roskatukkeuma
- Häiriöohje: Jäähdytyskanavan suppotukkeutuma

- Häiriöohje: Jäähdytyskanavan sortuma

5.7.1 Sähkön menetys

Oletettu alkutapahtuma on häiriö ulkoisessa sähköverkossa, mikä on johtanut siihen, että, reaktorin pinta on alittanut arvon 3,1 m, eikä jäähdytysveden pumppaus reaktoriin toimi sähkönsyötön puuttumisen vuoksi. [41]

Reaktorin jäähdyttämisen turvaamiseksi sähköt olisi saatava takaisin kiskoille 642, 662 ja 664 siten, että sähkönsyöttö voidaan turvata vähintään kahden osajärjestelmän hätäjäähdytysjärjestelmille. Ensisijaisesti sähköt tulee pyrkiä palauttamaan kiskoon 662 (dieselvarmennettu 660 V verkko). [41]

Mikäli molemmat ulkoiset verkot on menetetty ja kaasuturbiinilaitos ei ole käyttökunnossa, tilataan sähköä Harjavallan vesivoimalaitokselta Olkiluodon 110 kV:n kentälle. [41]

5.7.2 Järjestelmien 321 ja 324 menetys polttoaineenvaihdon aikana

Alkutilassa reaktori- ja polttoainealtaat ovat reunojaan myöten täynnä ja altaiden väliset portit ovat auki. Jälkilämpöä poistetaan 321-järjestelmän toisella piirillä sekä kahdella 324-järjestelmän piirillä (324E1-E2-723-713 ja 324E3-721-712). [39]

Oletettu alkutapahtuma on jälkilämmönpoistojärjestelmien 321 ja 324 samanaikainen menetys polttoaineenvaihdon ollessa käynnissä. [39]

Jälkilämmön poisto ilman 321- ja 324-järjestelmiä on mahdollista reaktori- ja polttoainealtaiden kautta juoksuttamalla niistä vettä suojarakennuksen lauhdutusaltaaseen, josta vettä pumpataan takaisin reaktoritankkiin 323-järjestelmän pumpulla. Lauhdutusallasta jäähdytetään 322-721-712 jäähdytysketjuilla. [39]

5.7.3 Järjestelmän 321 menetys polttoaineenvaihdon aikana

Lähtötilana laitos on polttoaineenvaihtoseisokissa reaktorin painesäilön kannen ollessa auki. Reaktori- ja polttoainealtaat ovat täynnä. Jälkilämpöä poistetaan 321- ja 324-järjestelmillä jäähdytysketjuilla 321E1-E2-721-712 ja 324E1-E2-723-713. [45]

Oletettu alkutapahtuma on 321-järjestelmän menetys laitevian tai putkivaurion vuoksi sillä seurauksella, että 321- ja 331-järjestelmät joudutaan eristämään. [45]

Tässä tilanteessa jälkilämmön poistoon voidaan käyttää 324-järjestelmän lisäjäähdytyspiirillä (324E3-721-712). 324-järjestelmä kykenee lisäjäähdytyspiirinsä kanssa jäähdyttämään reaktoria riittävästi ilman 321-järjestelmän apua. [45]

5.7.4 Reaktoripaineastian pohjavuoto polttoaineenvaihtoseisokissa

Lähtötilana laitos on polttoaineenvaihtoseisokissa reaktorin painesäilön kannen ollessa auki. Reaktorin jälkilämpöä ja polttoainealtaita jäähdytetään järjestelmillä 321 ja/tai 324. Lisäveden toimitus on järjestetty järjestelmästä 733. Molemmat henkilösulut ovat auki. Märkätilan ovet on avattu. TTKE 7.5 mukaiset ehdot on täytetty. [36]

Oletettu alkutapahtuma on, että pääkiertopumppujen tai säätösauvakoneiston huollon yhteydessä tapahtuneesta virheestä aiheutuu reaktorin painesäiliön pohjaan vuoto, jonka kautta reaktorista alkaa purkautua vettä suojarakennuksen alempaan kuivatilaan. Suurin mahdollinen edellä kuvattu vuoto on pääkiertopumpun läpiviennistä aiheutuva vuoto, jonka seurauksena reaktorisydän paljastuu 20 minuutin kuluttua, mikäli reaktoriin ei kyetä syöttämään lisää vettä ja reaktorihallin altaiden portit ovat kiinni. Mikäli vuoto on säätösauvakoneistossa, kestää sydämen paljastumiseen noin 3 tuntia. Instrumentointijärjestelmien vuodot ovat niin pieniä, että aikaa vuodon tukkimiseen on riittävästi ilman lisäveden saantiakin. Reaktorisydämen jäähdyttäminen vaikeutuu, jos vuotava vesi pääsee virtaamaan alemman henkilösulun kautta reaktorirakennukseen tai jos veden lisäämisestä huolehtivat järjestelmät 312-445, 322, 323, 327, 365, 733 ja 861 ovat osin käyttökunnottomia huoltojen takia. [36]

Vuodon syntyminen oletetaan havaittavan nopeasti, joko paikalla olevan henkilöstön toimesta tai valvomoon tulleista hälytyksistä. Tehtävät toimenpiteet riippuvat vuodon tyypistä. Laitoksen turvallisuudesta vastaavan henkilöstön tulee arvioida tilanteen vakavuus ja päättää mahdollisten jatkotoimenpiteiden laajuus, eli onko tilanteen edetessä kyseessä laitoshäiriö vai edellyttääkö tilanne valmiusorganisaation toimenpiteitä. [36]

Vakavin vuototyyppi on vuoto pääkiertopumpun akselin läpiviennistä, joka voi aiheuttaa 750 kg/s jäähdytevuodon. Ilman lisävettä reaktorisydän paljastuu 20 minuutissa, jos reaktorihallin altaiden portit ovat kiinni. Jos polttoainealtaiden portit ovat auki, niiden vedenpinta laskee 40 minuutissa alle 2,2 metrin, jolloin säteilytaso reaktorihallissa alkaa kohota. Kun vedenpinta polttoainealtaissa on laskenut polttoainealtaiden kynnyksen tasolle, jää polttoaineen päälle vielä noin 0,7 m vettä. [36]

Välittömänä toimenpiteenä suljetaan alahenkilösulku ja märkätilan ovet sekä poistetaan kaksi 316-alaspuhallusputkien suojakantta. Mikäli polttoainesiirtoja on käynnissä, pyydetään latauskoneen kuljettajaa laskemaan latauskoneessa kiinni oleva polttoaine-elementti paikalleen välittömästi. Tämän jälkeen polttoainealtaiden portit suljetaan. [36]

Reaktoriin aletaan pumpata vettä vähintään kahdella 323-piirillä. Kun 323 K301-K304 piirin virtaus näyttää noin 130 kg/s, aloitetaan pumppaus myös 327-järjestelmällä. Mikäli vettä tarvitaan vielä lisää, voidaan lisävettä saada käyttöön palovesijärjestelmästä 861, josta vettä saadaan siirrettyä reaktorialtaaseen reaktorihallin paloposteihin kytketyillä letkuilla. Jos säteilytaso reaktorihallissa on niin korkea, että paloletkujen liittäminen ei ole mahdollista, käytetään varareitteinä paloveden pumppausta järjestelmän 323 kautta reaktoriin ketjulla 861-365-322-323-211. Lopuksi palautetaan 324-järjestelmä takaisin käyttöön. [36]

Säätösauvan toimilaitteen läpiviennistä voi aiheutua 100 kg/s oleva vuoto. Tilanteessa tehtävät toimenpiteet ovat muuten samoja kuin pääkiertopumpun vuodossa, mutta nyt riittää lisäveden syöttöön yksi 327- ja yksi 323-piiri, joista vettä syötetään reaktoriin tarpeen mukaan. Lauhdutusallasta jäähdytetään lämmönsiirtoketjulla 322-721-712.

Veden pinta alemmassa kuivatilassa pyritään stabiloimaan + 25 m tasolle, josta vettä kierrätetään reaktoriin 323-järjestelmällä. [36]

Vuodossa neutronivuon mittausjärjestelmästä lisäveden tarve on 45 kg/s. Toimenpiteet noudattavat samaa kaavaa kuin kahdessa edellisessä tapauksessa, joskin lisäveden tarve on nyt oleellisesti pienempi, joten kaikkia mahdollisia lisäveden syöttämiseen soveltuvia järjestelmiä ei tarvitse ottaa käyttöön. [36]

5.7.5 Instrumenttiputken murtuma tietyissä huonetiloissa

Ohje käsittelee paineastiaan liittyvän instrumenttiputken murtumasta aiheutuvaa pientä jäähdytevuotoa. Instrumenttiputken murtumaa pidetään mahdollisen kaikissa käyttötiloissa, joissa reaktori on paineellinen. Vuodon koko on tässä tapauksessa huomattavan pieni verrattuna vuotoon pääkiertopumpun yhteestä, joten korjaaville toimenpiteille on reilusti aikaa. Korjaavat toimenpiteet ovat seuraavat [40]:

- Vuotavan instrumenttiputken yksilöinti
- Vuotavan instrumenttiputken eristysventtiilin sulkeminen
- Eristysventtiilin avaaminen korjauksen jälkeen

5.7.6 Onnettomuudet polttoaineen käsittelyn yhteydessä

Lähtötilanteena ei ole erikseen määritetty tapahtuman aikaista käyttötilaa. Polttoainesiirtoja tehdään kuitenkin paljon seisokin aikana, joten kyseinen tapahtuma voidaan käsittää myös seisokin aikaiseksi. Oletettu alkutapahtuma on polttoainenipun vaurioituminen sen siirron tai käsittelyn yhteydessä. Tämän seurauksena aktiivista fissiokaasua voi vapautua reaktorihalliin. [37]

Välittöminä toimenpiteinä reaktorihallin suodatettu ilmastointi käynnistetään ja reaktorihallista poistetaan kaikki henkilöt. Mahdollisesti aktiivisia fissiokaasuja hengittäneet henkilöt nauttivat joditabletin. Reaktorihallin säteilytasoa tarkkaillaan, ja arvioidaan onko kyseessä valmiussuunnitelmassa määritelty valmiustilanne. [37]

5.7.7 Jäähdytyskanavan tukkeama tai sortuma

Seisokin aikana järjestelmien 321 ja 324 jäähdytysketju kulkee järjestelmien 721 ja 712 kautta. Järjestelmä 712 saa jäähdytysvesikanavien kautta tulevan meriveden puhdistettuna 711-puhdistusjärjestelmästä ja poistaa veden jäähdytysveden poistokanaviin. [38]

Jäähdytyskanavan tukkeutuessa tai sortuessa jäähdytysveden tulosuuntaa voidaan muuttaa päinvastaiseksi, siten että vettä otetaan sisään poistotunnelista ja suorittaa veden ulosvirtaus 434-imukuopan kautta. Mikäli imukuoppa ei ole käytettävissä, varaudutaan apurakennuksien tulvimiseen avaamalla niiden ulko-ovet. [38]

6 LOVIISAN YDINVOIMALAITOS: YKSIKÖT 1 JA 2

Loviisan ydinvoimalaitos sijaitsee Suomenlahden rannikolla Hästholmenin saarella noin 15 kilometrin päässä Loviisan keskustasta. Loviisan ydinvoimalaitos koostuu kahdesta identtisestä laitosyksiköstä Loviisa 1 (LO1) ja Loviisa 2 (LO2). Laitosalueella sijaitsee lisäksi matala- ja keskiaktiivisen voimalaitosjätteen loppusijoitusluola ja käytetyn polttoaineen välivarasto.

Loviisan voimalaitoksen omistaa energiayhtiö Fortum, jonka suurin omistaja 50,76 % osuudella on Suomen valtio [13]. Laitoksen käytöstä vastaa Fortumin tytäryhtiö Fortum Power & Heat. Fortum haki valtioneuvostolta lupaa kolmannelle laitosyksikölle Loviisaan, mutta uusi hakemus sai eduskunnalta kielteisen periaatepäätöksen vuonna 2010.

Kuva 5. Loviisan ydinvoimalaitos. [49]

6.1 Laitoksen yleiskuvaus

Loviisan reaktorit ovat venäläisiä VVER-440-tyyppisiä painevesireaktoreita. Reaktoreiden hankintaan vaikutti ajalle tyypillisesti politiikka ja erityisesti suhteet itänaapuriin. Alkuperäisessä tarjouskilpailussa 1960-luvun lopussa oli mukana vain länsimaisia toimittajia, mutta lopulta voimalatilaus meni viime hetkellä mukaan

kilpailuun tulleelle venäläiselle Atomstroyeksportille. VVER-440 ja siitä kehitetty uudempi VVER-1000 ovat yleisiä reaktorityyppejä Venäjällä ja monissa Itä-Euroopan maissa. VVER-440-tyypin reaktoreita on käytössä Loviisan lisäksi muun muassa Slovakian Bohunicessa, Unkarin Paksissa ja Venäjän Kuolassa. [48] [57, s. 16]

Loviisan ydinvoimalaitoksen rakennustyöt aloitettiin 1970-luvun alussa. Loviisa 1 aloitti sähköntuotannon vuonna 1977 ja Loviisa 2 vuonna 1980. Laitoksilla on nykyistä käyttölupaa jäljellä vuosiin 2027 (LO1) ja 2030 (LO2). Laitosten nettosähköteho oli käynnistettäessä 440 MW, mutta erilaisilla muutostöillä tehoa on korotettu nykyiseen 488 MW:n tehoon laitosta kohden. Laitosten tärkeimpiä teknisiä tietoja on esitetty taulukossa 9. [15]

Taulukko 9. Loviisan laitosyksiköiden 1 ja 2 yleistiedot. [2] [5]

Reaktorin lämpöteho	1500 MW
Nettosähköteho	488 MWe
Hyötysuhde	32,5 %
Höyrynvirtaus	413 kg/s
Käyttöpaine	122,5 bar
Jäähdytteen lämpötila reaktorin sisääntulossa	265°C
Jäähdytteen lämpötila reaktorin uloslähdössä	299°C
Polttoainenippujen määrä	313
Polttoainesauvoja nipussa	126
Polttoainenipun massa	120 kg
Uraanin kokonaismassa	37,3 t
Säätösauvojen lukumäärä	37
Höyrystimien lukumäärä	6

Laitosyksiköt ovat tyypiltään painevesireaktoreita, eli niissä ylläpidetään primääripiirissä niin korkeaa painetta, että vesi ei höyrysty vaan säilyy nestemäisenä. Höyry turbiineille tuotetaan sen sijaan erillisissä höyrystimissä, jotka erottavat myös primääri- ja sekundääripiirin toisistaan. Loviisan laitoksissa on kuusi vaakatasoon asennettua höyrystintä, eli niin sanottua vaakahöyrystintä. Reaktorista vesi kulkee kiertopiirin kuumahaaran kautta höyrystimen kollektoriin, josta vesi siirtyy ohuisiin vesiputkiin (tuubeihin). Tuubeista siirtyy lämpöä höyrystimeen sekundääripuolelta

syötettyyn syöttöveteen, joka kuumentuessaan höyrystyy. Syntynyt höyry johdetaan höyrynkeräimen kautta turbiinille. Höyrystimessä jäähtynyt primääripiirin vesi johdetaan kylmää haaraa pitkin takaisin reaktoriin. [1]

Reaktorin primääripiirin painetta säädetään paineentasausjärjestelmällä, jonka keskeisin komponentti on osittain veden ja osittain höyryn täyttämä paineistin. Paineistin on yhdistetty alapään vesitilasta kiertopiirien YA13 ja YA14 kuumiin haaroihin ja yläosan höyrytilasta samojen kiertopiirien kylmiin haaroihin ruiskutusjärjestelmän kautta. Paineen säätö paineistimella perustuu siinä olevan veden ja höyryn suhteen säätöön. Kun primääripiirin painetta halutaan nostaa, höyryn osuutta lisätään höyrystämällä paineistimen vettä sähkövastuksilla höyryksi. Paineen alentamiseksi vastaavasti lauhdutetaan paineistimen sisältämää höyryä ruiskutusjärjestelmän avulla vedeksi. Mikäli primääripiirin paine nousee häiriön vuoksi yli 132 barin, avautuu paineistimen ulospuhallusventtiili automaattisesti. Paineistimesta puhalletaan tällöin höyryä erilliseen puhallussäiliöön, jossa höyry lauhdutetaan vesikierron avulla vedeksi. [1]

Loviisan turbiinilaitos koostuu molemmille laitosyksiköille yhteisestä turbiinihallista. Molemmilla yksiköillä on käytössä kaksi rinnakkaista turbiinia, joista kunkin bruttosähköteho on 255 MWe. Turbiinilaitoksessa on ainoastaan sekundääripiirin järjestelmiä, minkä vuoksi se ei ole säteilyvalvottua aluetta. [4]

Reaktorin säätösauvajärjestelmä koostuu 37 säätösauvasta, joita ohjataan reaktoripainesäiliön yläpuolella sijaitsevasta säätösauvojen ohjausyksiköstä. Loviisan reaktoreiden säätösauvat ovat polttoainenippujen kokoisia booriterästangoista koostuvia säätöelementtejä, joiden alapäähän on liitetty tavallisten polttoainenippujen tapaiset polttoainejatkeet. Säätösauvat on jaettu kuuteen toiminnalliseen ryhmään siten, että vain yksi seitsemän säätösauvaa sisältävä ryhmä osallistuu varsinaiseen tehon säätöön. Loput säätösauvaryhmät ovat tehoajon aikana yläasennossa ulkona reaktorisydämestä ja ne otetaan käyttöön vain alasajotilanteissa ja seisokin aikana. Häiriötilanteen sattuessa voidaan reaktorin pikasulku suorittaa katkaisemalla virta säätösauvoja kannattelevilta

sähkömagneeteilta, jolloin säätösauvat laskeutuvat reaktoriin painovoiman vaikutuksesta. [3] [5]

6.2 Laitoksen turvallisuus

Loviisan laitokset ovat toimineet koko käyttöikänsä ajan turvallisesti. Laitosyksiköillä on ollut neljä INES 2 -tasolle luokiteltua tapahtumaa, joista viimeisin tapahtui vuonna 1993. Kaikki laitoksilla tapahtuneet INES 2 -tason tapahtumat on lueteltu taulukossa 10. [59]

Taulukko 10. Loviisassa tapahtuneet INES 2 -tason tapahtumat. [59]

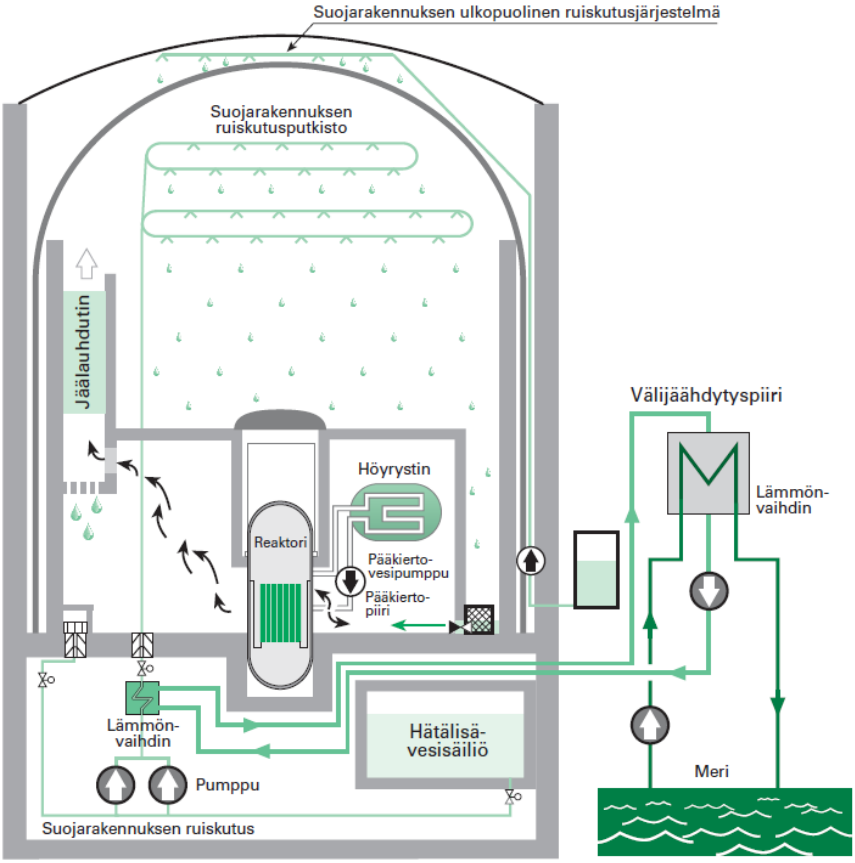
Vuosi	Laitos	Tapahtuma
1981	LO2	Reaktorin pikasulku ja hätäjäähdytyksen käynnistyminen
1987	LO2	Pää- ja hätäsyöttöveden menetys
1988	LO1	Hätälisävesisäiliön laimentuminen seisokissa
1993	LO2	Pääsyöttövesiputken katko

Laitosten toimittajaa valittaessa venäläisten tarjoaman VVER-440-reaktorin turvallisuus herätti Suomessa arveluita; muun muassa turvallisuusjärjestelmiä ei pidetty alkuunkaan riittävinä. Alkuperäisessä venäläisessä laitosmallissa ei esimerkiksi ollut lainkaan suojarakennusta. Suomen viranomaiset ja laitoksen tilaaja, Imatran Voima (nykyisin Fortum), vaativat tilauksen ehdoiksi, että laitoksen tulee valmistuessaan täyttää länsimaiset turvallisuusvaatimukset. Vaatimusten täyttämiseksi laitoksiin hankittiin tehokkaammat hätäjäähdytysjärjestelmät ja suojarakennus, jotka tilattiin erikseen länsimaisilta toimittajilta. Myös laitoksen automaatio- ja suojausjärjestelmissä päädyttiin venäläisten sijasta länsimaisiin ratkaisuihin. Kyseisten muutosten takia Loviisan laitos eroaa huomattavasti muista VVER-440 laitoksista sen ollessa ainutlaatuinen yhdistelmä aikakautensa idän ja lännen teknologiaa. [57, s. 16-17]

Loviisan laitosten suojarakennus on painevesireaktoreille tyypillisesti massiivisen kokoinen. Suojarakennuksen suuri koko selittyy sillä, että koko primääripiiri on sijoitettu sen sisälle. Loviisan suojarakennus on varustettu kahdella höyryn painetta alentavalla järjestelmällä: jäälauhduttimella ja suojarakennuksen

vesiruiskutusjärjestelmällä. Jäälauhdutin on suojarakennuksen reunalla sijaitseva tila, joka koostuu booripitoista jäätä sisältävistä koreista. Onnettomuustilanteessa jäälauhduttimen pohjalla olevat luukut avataan, jolloin suojarakennuksen alatilassa oleva höyry ajautuu sisään jäälauhduttimeen ja lauhtuu vedeksi. Suojarakennuksen vesiruiskutusjärjestelmä koostuu reaktorihallissa olevista sprinklereistä, joilla voidaan paineen alentamiseksi jäähdyttää suojarakennuksen ala- ja ylätilaa. Ruiskutusjärjestelmällä saadaan myös huuhdottua suojarakennukseen mahdollisesti joutuneita höyrystyneitä ja hiukkasmaisia radioaktiivisia aineita ilmatilasta veteen. Ruiskutusvesi voidaan palauttaa suojarakennuksen lattiakaivoista jäähdyttimien kautta takaisin ruiskutuskiertoon. [57, s. 181]

Laitosten suunnittelussa on varauduttu myös tilanteeseen, jossa edellä mainitut järjestelmät eivät toimi. Tällöin höyrynpaine voi ylittää suojarakennuksen suunnittelupaineen, jolloin sen tiiveys on uhattuna. Tämän takia Loviisan voimalaitoksen suojarakennukset varustettiin 1990-luvun alussa ulkopuolisella ruiskutusjärjestelmällä. Se toimii kastelemalla suojarakennuksen ulkopintaa, jolloin suojakupolin teräs jäähtyy niin paljon, että suojarakennuksen sisällä oleva höyry lauhtuu sisäpinnalla. Suojarakennus on esitetty kuvassa 6. [57, s. 186]



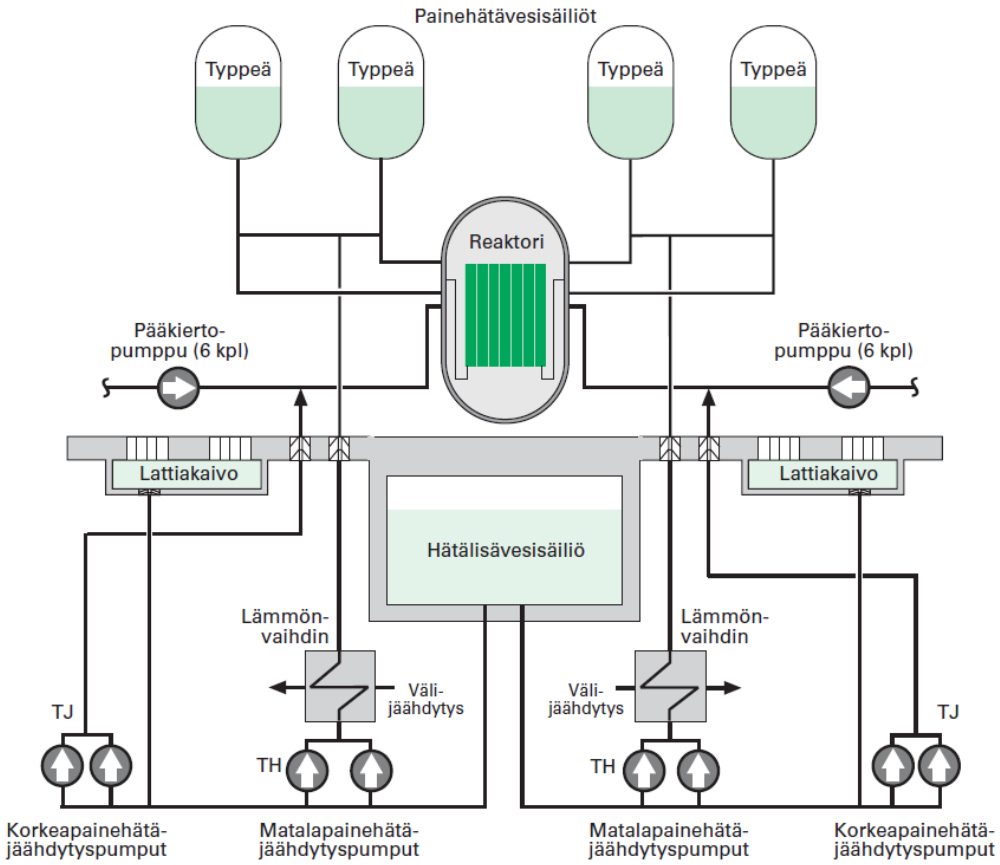
Kuva 6. Loviisan suojarakennuksen poikkileikkaus. [57, s. 62]

Jäähdytteenmenetysonnettomuuden varalta laitoksissa on hätälisävesijärjestelmä TJ ja hätäjäähdytysjärjestelmä TH.

TJ-järjestelmä otetaan käyttöön niissä primääripiirin vuodoissa, joissa normaali lisävesijärjestelmä ei riitä pitämään primääripiirin jäähdytemäärää riittävänä. TJ-järjestelmä koostuu neljästä pumpusta, joiden avulla voidaan pumpata booripitoista jäähdytettä reaktoriin TH00B01-hätälisävesisäiliöstä. Isommassa vuodossa voidaan ottaa käyttöön myös sumppikierto lattiakaivojen kautta ja jäähdyttää reaktoria niin sanotulla feed & bleed -periaatteella. Siinä reaktoriin syötetty vesi vuotaa sumppiin ja pumpataan jäähdytyksen jälkeen uudestaan reaktoriin. [57, s. 60]

TH-hätäjäähdytysjärjestelmää käytetään suurissa primääripiirin vuodoissa. TH-järjestelmään kuuluu neljä booripitoista vettä sisältävää painehätävesisäiliötä (TH-

paineakut), jotka on paineistettu typellä 35 barin paineeseen. Paineakusta saadaan nopeasti syötettyä vettä korkealla paineella reaktoriin, kun primääripiirin paine laskee paineakun toiminta-alueelle. Painehätävesisäiliön lisäksi TH-järjestelmään kuuluu neljä TH-pumppua, joilla booripitoista jäähdytettä voidaan TJ-järjestelmän tavoin pumpata reaktoriin TH00B01-hätälisävesisäiliöstä sekä lattiakaivojen kautta kierrättämällä. TH-järjestelmää jäähdytetään lämmönsiirtoketjulla TH-TF-VF. Loviisan laitosten hätäjäähdytysjärjestelmät ovat esillä kuvassa 9. [57, s. 60]



Kuva 7. Loviisan primääripiirin hätäjäähdytysjärjestelmät. [57, s. 60]

Loviisan ydinvoimalaitosten sähkönsaanti on moninkertaisesti varmistettu. Mikäli yhteys ulkoiseen sähköverkkoon menetetään, käynnistyvät molemmilla laitoksilla olevat neljä hätädieselgeneraattoria automaattisesti. Tämän lisäksi laitosyksiköillä on yksi yhteinen dieselgeneraattori, joka tuotiin korvaamaan paikalla aikaisemmin ollut

kaasuturbiinivoimalaitos. Sähköä on mahdollista syöttää myös laitosyksiköltä toiselle. Tarvittaessa laitokselle voidaan syöttää sähköä myös suoraan Ahvenkosken vesivoimalaitokselta erillisellä 20 kV:n yhteydellä. [14]

6.3 Vuosihuollot

Loviisassa vuosihuollot pidetään alkusyksyllä heinä – lokakuussa. Vuosihuollot on suunniteltu siten, että kussakin laitosyksikössä on laaja huoltoseisokki neljän vuoden välein. Pisin vuosihuolto on kahdeksan vuoden välein tehtävä 42 vuorokauden pituinen seisokki, joka oli Loviisa 1:llä vuorossa syksyllä 2012. Lyhimmillään vuosihuolto on 16 vrk. pituinen, jolloin tehdään polttoaineenvaihdon lisäksi vain lyhytkestoisia huolto- ja tarkastustöitä. Vuonna 2015 Loviisa 1:llä suoritetaan automaatiojärjestelmän uudistukseen keskittyvä laaja huoltoseisokki, jonka arvioitu kesto on 100 päivää. [16]

6.3.1 Seisokin käyttötilat

Laitoksille on olemassa kuusi eri käyttötilaa, jotka ovat esillä taulukossa 11. Näistä luetaan seisokkitiloihin kuuluviksi latausseisokki, kylmä seisokki ja kuuma seisokki. [55]

Taulukko 11. Loviisan laitosten käyttötilat. [55]

Käyttötila	Primäärijäähdytteen lämpötila (°C)	Primääripiirin paine (bar)	Boorihappopitoisuus (g/kg H_2O)	Neutroniteho (%)
1. Latausseisokki	< 70	paineeton	14 ± 1	0
2. Kylmä seisokki	< 95	< 30 bar	14 ± 1	0
3. Kuuma seisokki	95 – 165	P_B – 125	14 ± 1	0
4. Kuumavalmius	165 – 308	P_B – 125	B_A – 15	0
5. Käynnistystila	250 – 305	121 - 125	14 ± 1	< 2
6. Tehokäyttö	< 308	121 - 125	< B_A	> 2

Taulukon arvoista primääripiirin jäähdytteen sallitun paineen alaraja P_B saadaan jäähdytteen ulostulolämpötilan mukaan höyryn kiehumakäyrältä. Boorikonsentraatio B_A on riippuvainen palamajakson pituudesta.

6.3.2 Alasajo tehoajolta kylmäseisokkiin

Alasajoa edeltää joukko alustavia toimenpiteitä joiden tulee olla tehtynä noin vuorokautta ennen alasajon aloitusta. Näihin kuuluvat mm. prosessitekniset valmiustarkastukset, apukattilan lämmitys valmiustilaan, omakäyttöhöyryn saatavuuden varmistus toiselta laitosyksiköltä sekä laitoksen vesikemian valmistelu seisokkia varten. [30]

Alasajo edellyttää useita samanaikaisia toimia sekä primääri- että sekundääripiirissä. Turbiinien alasajo tehdään rinnan, jos erillistä alasajojärjestystä ei ole tehty. Turbiinin alasajon yhteydessä tehdään tarvittavat koestukset. Reaktorin tehon laskun gradientti saa olla korkeintaan 60 MW/h. Tehon lasku 15 – 20 % teholle suoritetaan säätösauvaryhmän M-tilan ryhmäohjauksella, jonka jälkeen kytketään neutronivuosäätö päälle. Tästä jälleen palataan säätösauvojen M-tilan ryhmäohjaukseen ja lasketaan reaktorin teho 5 %:iin. Tämän jälkeen varmistetaan, että:

- Turbiinin ohitusjärjestelmä RC toimii oikein
- Apuhöyryä on saatavissa toiselta laitosyksiköltä tai apukattilasta
- Syöttövesisäiliöiden veden sekoitus/lämmitys on kunnossa
- Lisävesireitti RV-SD-RM-RL on käyttökunnossa
- Jälkilämmönpoistojärjestelmän RR molemmat piirit käyttökunnossa [30]

Tämän jälkeen reaktori ajetaan alikriittiseksi ajamalla säätösauvat ryhmäohjauksella sähköisille alarajoille. Alikriittisyyden saavuttaminen varmistetaan neutronimittauksilla. [30]

Tehonlaskun aikana suoritetaan myös primääripiirin booraus. Primääripiiriin boorihappopitoisuus tulee nostaa arvoon 14,0 g/kg. Boorauksen jälkeen aloitetaan kaasunpoistokierrätys ja primääripiirin jäähdyttäminen kohti tavoitelämpötilaa 140 °C. Reaktorin lämpötilan laskiessa 140 °C:een aloitetaan höyrystimien täyttö. Höyrystimien täytyttyä siirrytään RR-järjestelmän höyry-vesi-lämmönsiirrosta vesi-vesi-lämmönsiirtoon. [30]

Primääripiirin jäähdytystä jatketaan RR-järjestelmällä gradientilla 25 °C/h. Laitoksen katsotaan TTKE:n mukaan olevan kylmäseisokissa, kun reaktorin lämpötila on alle 95 °C. Reaktorin lämpötilan laskiessa 50 °C:een, aloitetaan valmistelut reaktorin jäähdytyksen siirtämisestä luonnonkierrolle. Tällöin muut kuin luonnonkiertopiirien pääkiertopumput pysäytetään. Kolme kiertopiiriä erotetaan primääripiiristä. Kahdessa luonnonkiertopiirissä on pääkiertopumppu päällä ja yhdessä pumppu seisoo. TC-suodattimet erotetaan nyt primääripiiristä. Nyt ollaan valmiit pysäyttämään luonnonkiertopiirien pääkiertopumput, jolloin jäähdytys siirtyy luonnonkierrolle. Pumput pysäytetään samanaikaisesti ja samalla erotetaan kolmas vielä erottamatta jäänyt kiertopiiri. Luonnonkierron toimivuus tarkastetaan seuraamalla reaktorin lämpötiloja. [30]

6.3.3 Jälkilämmön poisto

Reaktorin jälkilämmön poistossa käytetään hyväksi luonnonkiertoa, jonka avulla saadaan jäähdytettä kierrätettyä primääripiirissä ilman pääkiertopumppujen apua. Primääripiiristä jälkilämpöä siirrettään höyrystimien välityksellä sekundääripiiriin. Höyrystimiin tuodaan seisokin aikana vesikierto jälkilämmönpoistojärjestelmällä RR. Lämmönsiirto höyrystimessä voi tapahtua seisokin vaiheesta joko vesi-höyry tai vesi-vesi -faaseissa. RR-järjestelmän kapasiteetti on 5 % reaktorin nimellislämpötehosta. [22]

RR-järjestelmälle on olemamassa varajärjestelmä vara-RR. Se on toimintaperiaatteiltaan samanlainen kuin normaali RR-järjestelmä. Varajärjestelmää ja normaalia järjestelmää ei kuitenkaan voida käyttää rinnan. [22]

6.3.4 Järjestelmien erotukset

Loviisassa seisokin aikataulua suunniteltaessa laaditaan prosessiriippuvuus-aikataulu, jossa järjestelmien erotukset on esitetty. Huoltotöitä ei koskaan tehdä molemmissa redundansseissa samaan aikaan, vaan toisen redundanssin ollessa huollossa on toisen oltava käytettävissä. Huoltotöiden vaatimat järjestelmien erotukset tehdään

pääsääntöisesti niin sanottuina erotuspaketteina. Erotuspaketeissa on kaikki tiettyyn järjestelmään kuuluvat komponentit, esimerkiksi jokin pumppu ja siihen liittyvät apujärjestelmät, erotettu siten, että ne eivät huollon aikana vaaranna muiden järjestelmien käyttökuntoisuutta.

6.3.5 Polttoaineen vaihto

Ennen polttoaineen vaihtoa laitos ajetaan käyttötilaan latausseisokki. Polttoaineenvaihto edellyttää eräiden reaktorin sisäosien, kuten säätösauvakoneiston irrottamista. Polttoaineenvaihdon aikana reaktorikuilu täytetään vedellä ja reaktorikuilun ja polttoainealtaan yhdistävä portti avataan. Portin kautta pystytään latauskoneella siirtämään käytetty polttoainenippu jäähtymään polttoainealtaaseen ja vastaavasti tuomaan uusi nippu reaktoriin. Koko kuljetuksen ajan polttoainenippu on veden alla, jolloin sen säteily vaimenee tehokkaasti eikä ylikuumenemisen riskiä ole.

Tällä hetkellä Loviisassa käytetään kolmierälatausta, eli kerralla vaihdetaan aina kolmannes polttoaineesta uuteen. Tulevaisuudessa Loviisassa ollaan siirtymässä nelieräalataukseen uusien korkeapalamaisten polttoainenippujen käyttöönoton myötä.

6.3.6 Seisokin aikana tehtävät huolto- ja tarkastustyöt

Reaktorissa tehtävät työt yleensä määrittävät koko seisokin pituuden ja muiden järjestelmien huolto-, uudistus- ja korjaustöiden aikataulut suunnitellaan sen mukaisesti. Lyhyessä polttoaineenvaihtoseisokissa tehdään vain pieniä huolto- ja tarkastustöitä, jotka pystytään toteuttamaan tiukassa aikataulussa. Nelivuotishuollossa tehdään muun muassa primääri- ja sekundääripiirin painekokeet sekä poistetaan reaktorista polttoaine-elementit ja sisäosat reaktoripainesäiliön tarkastusta varten. Kahdeksanvuotishuollossa tehdään nelivuotishuoltoja syvällisemmät kone-, automaatio- ja sähköjärjestelmien tarkastukset. Näiden töiden lisäksi neli- ja kahdeksanvuotishuolloissa voidaan tehdä mittavia järjestelmien korjaus- ja uudistustöitä. [17] [18]

6.3.7 Ylösajo

Ylösajoa varten laitos tulee saattaa kuumavalmiustilaan. Primääripiirin lämpötilan tulee tällöin olla n. 255 °C ja paineen n. 123 bar. Lämpönieluna toimii RR- tai RC-järjestelmä. Merivesijärjestelmän VC-pumppujen tulee olla käynnissä. Reaktoria ylös ajaessa on kiellettyä käyttää reaktiivisuuden kasvattamiseen primääripiirin booripitoisuuden laimentamista ja samanaikaisesti vetää säätösauvoja ylös, vaan edellä mainitut toimenpiteet on aina tehtävä eri aikaan. Ennen kun reaktorille voidaan antaa käynnistyslupa, sen tulee täyttää käynnistysehdot. [56]

Valmistelut laitoksen ylösajoa varten aloitetaan pikasulkukoestuksilla. Koska reaktori on seisokin aikana myrkyttynyt ksenonilla, tulee primääripiirin booripitoisuutta laimentaa syöttämällä laimeampaa booriliuosta primääripiiriin. Kun tavoitettu booripitoisuus on saavutettu, aletaan nostaa säätösauvaryhmiä I-V ryhmittäin sähköiselle ylätasolle. Tämän jälkeen jatketaan booripitoisuuden laimentamista. Reaktorin tehon ollessa alle 1 % suoritetaan pientehokokeita, joihin kuuluu muun muassa pikasulku. Reaktorin tehon noustessa arvoon 2 % suoritetaan tehokoe, jossa varmistetaan että reaktorin lataus on lataussuunnitelmaa vastaava. [56]

Reaktorin tehoa nostetaan välillä 2 – 15 % neutronivuosäädöllä. Painesäätöön voi siirtyä sen jälkeen kun ensimmäinen turbiini on saatu tehoajolle. Turbiinin käynnistämistä varten reaktorissa tulee olla turbiinin pyörittämiseksi 3000 kierroksen minuuttinopeudella vaaditun tehon lisäksi 10 % tehoreservi. Turbiinin teho ei saa aluksi ylittää 50 MW:a. Tuorehöyryn paine säädetään lukemaan 44 bar. Tästä eteenpäin voidaan reaktorin tehoa korottaa 1 – 2 % askelissa. Tehon ylittäessä 25 % avataan toinen RC-venttiili. [56]

6.4 Seisokkitilojen PRA

Loviisassa päivitettiin vuonna 2011 PRA, jossa arvioitiin niin tehoajon kuin seisokkitilojen aikaisten alkutapahtumien sydänvauriotaajuutta. Loviisan laitosten kokonaissydänvauriotaajuudeksi on arvioitu $4{,}29 \cdot 10^{-5}$/a. Sydänvauriotaajuudesta 61 %

käsitetään vuosihuoltojen aikaiseksi ja 39 % tehoajon aikaiseksi. Sydänvauriotaajuudet on esitetty taulukossa 12.

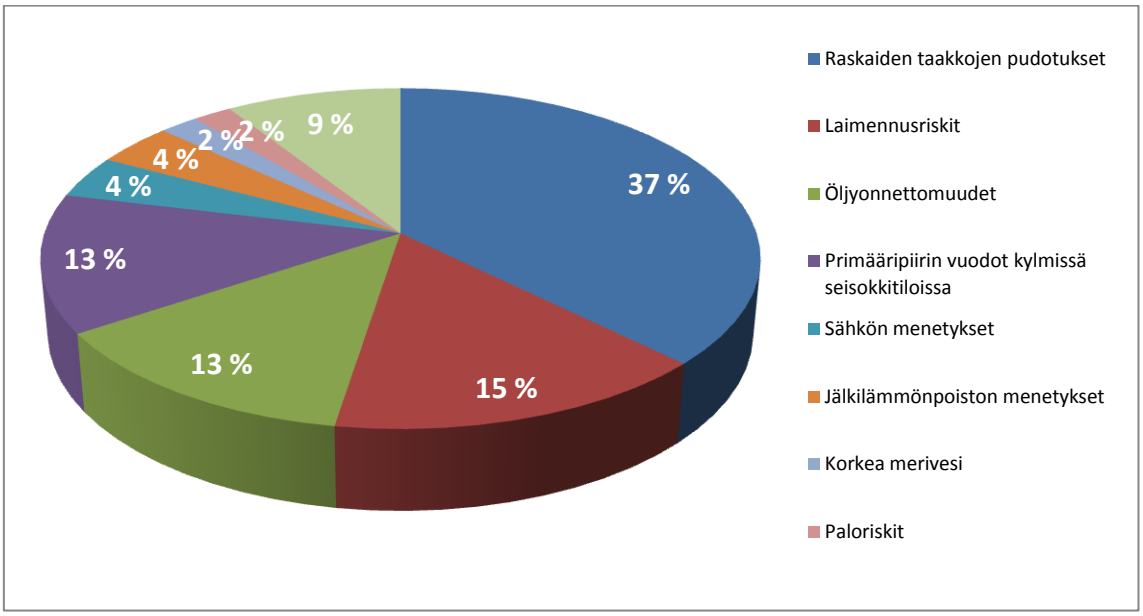
Taulukko 12. Sydänvauriotaajuudet käyttötiloittain.

Käyttötila	CDF(1/a)	%
Tehoajo	1,67E-05	39
Vuosihuolto	2,62E-05	61
Yhteensä	4,29E-05	100

Merkittävimmät kylmän seisokin aikaiset alkutapahtumat sydänvauriotaajuuden perusteella on lueteltu taulukossa 12. [12, s. 2-3]

Taulukko 13. Kylmän seisokin alkutapahtumien riskijakauma.

Alkutapahtuma	%
Raskaiden taakkojen pudotukset	37
Laimennusriskit	15
Öljyonnettomuudet	13
Primääripiirin vuodot kylmissä seisokkitiloissa	13
Sähkön menetykset	4
Jälkilämmönpoiston menetykset	4
Korkea merivesi	2
Paloriskit	2
Muut	9



Kuva 8. Sydänvauriotaajuus alkutapahtumittain.

6.4.1 Raskaiden taakkojen pudotukset

Sydänvaurioriskin kannalta ylivoimaisesti merkittävin seisokin aikainen alkutapahtuma on raskaiden taakkojen pudotukset, jotka vastaavat 37 %:a seisokin sydänvaurioriskistä. Raskaan taakan putoaminen on arvioitu mahdolliseksi ainoastaan käyttötilassa latausseisokki. Korkea riski johtuu siitä, että Loviisan laitosyksiköissä polttoaineen vaihto edellyttää reaktorin päällä sijaitsevien raskaiden komponenttien purkamista ja liikuttamista reaktorihallissa.

Raskaimmat nostettavat komponentit painavat yli 150 t, joten matalaltakin tapahtunut putoaminen voi aiheuttaa vakavia seurauksia. Suojaputkiyksikön tai reaktorin kannen putoamisen on arvioitu voivan aiheuttaa polttoaineen vaurioitumisen taakan pudotessa suoraan reaktorikuiluun tai latausaltaaseen. Taakan putoaminen +25.40 tasolle (reaktorihallin sisäänkäyntitaso) voi aiheuttaa kiertopiirin rikkoutumisen, sillä reaktorihallin lattiaa ei ole mitoitettu kestämään raskaan taakan pudotusta. [10, s. 35]

6.4.2 Laimennusriskit

Laimennusriskit on arvioitu toiseksi merkittävimmäksi seisokin aikaiseksi alkutapahtumaksi sen edustaessa 15 %:a seisokin sydänvaurioriskistä. Primääripiirin booripitoisuuden aiheettoman laimenemisen on arvioitu voivan aiheuttaa sydänvaurioon johtavan reaktiivisuusonnettomuuden. Koska primääripiirin vesitilavuus on suuri, pidetään boorin homogeenista laimenemista vaaralliselle tasolle hyvin epätodennäköisenä. Kuitenkin booripitoisuus voi paikallisesti alentua hyvinkin voimakkaasti ja aiheuttaa siten paikallisen kriittisyyden. On arvioitu, että reaktiivisuusonnettomuuden syntymiseen voi riittää tilavuudeltaan 0,5 m^3 suuruinen puhtaan veden tulppa, mikäli sekoittumista ei tapahdu. [11]

Paikallinen boorin laimeneminen voi aiheutua siitä, että primääripiiriin jostain syystä syntynyt laimentuneen booripitoisuuden veden tulppa pääsee sekoittumatta tai heikosti sekoittuneena reaktoriin. Edellytys tällaisen tulpan syntymiselle on, että primääripiirin virtaus on väliaikaisesti pysähtynyt silloin kun piiriin joutuu puhdasta tai laimeaboorista vettä. Edellä mainittu tilanne voi syntyä esimerkiksi silloin kun luonnonkierto heikkenee jostain syystä tai pääkiertopumppujen käytössä on ongelmia (virheellinen käyttö tai äkillinen pysähdys). Puhdasta, ei booripitoista, vettä voi joutua aiheettomasti primääripiiriin ulkoisesti vuotojen ja venttiilien virheellisten toimintojen kautta tai sisäisesti onnettomuuden yhteydessä primääripiirin kiehuessa ja lauhtuessa. [10, s. 55]

6.4.3 Öljyonnettomuudet

Öljyonnettomuuden on arvioitu olevan kolmanneksi suurin seisokin aikainen sydänvaurioriski 13 % osuudella. Öljykuljetusten määrä Suomenlahdella on kasvanut voimakkaasti viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana. Lisääntyvät öljykuljetukset muutenkin vilkkaasti liikennöidyllä Suomenlahdella kasvattavat vakavan öljyonnettomuuden riskiä. Öljyonnettomuus on merkittävin ulkoinen alkutapahtuma. Nykyisillä liikennemäärillä on arvioitu, että seurauksia Loviisan ydinvoimalaitokselle aiheuttavan öljyonnettomuuden taajuus on tehoajon aikana $1{,}9 \cdot 10^{-3}$/a ja seisokissa $1{,}7 \cdot 10^{-4}$/a. [46] [12, s. 3]

Mikäli öljyä pääsee leviämään runsaasti mereen laitoksen lähialueella, on arvioitu, että öljy voi tukkia meriveden otto- ja poistoaukot ja estää näin täydellisesti laitoksen merivesipiirien toiminnan, eikä merta voida näin ollen käyttää lämpönieluna. Öljyn todellista käyttäytymistä ottoaukolla ei kuitenkaan ole tutkittu. Mikäli öljyä on vain meriveden ottopuolella, voidaan jäähdytysveden otto kääntää poistopuolelle, joka on eri puolella voimalaitossaarta. [12, s. 3]

6.4.4 Primääripiirin vuodot

Primääripiirin vuoto on arvioitu neljänneksi suurimmaksi seisokin sydänvaurioriskiksi 13 % osuudella. PRA:ssa on analysoitu paljon erikokoisia seisokin aikaisia vuotoja. Seisokin aikana merkittävimmät alkutapahtumat primääripiirin vuodoille ovat pääsulkuventtiilin virheellinen avautuminen, raskaan taakan putoaminen ja TC-rajaventtiilin virheellinen avautuminen. [12, s. 3]

6.4.5 Sähkön menetykset

Sähkön menetys on arvioitu viidenneksi suurimmaksi seisokin sydänvaurioriskiksi 4 % osuudella. Sähkön menetys voi johtaa jälkilämmönpoiston ja turvallisuusjärjestelmien menetykseen, mistä aiheutuu polttoaineen ylikuumeneminen ja sydänvaurio. Seisokin aikaiset sähkön menetys -alkutapahtumat voidaan jakaa sähkökiskojen menetyksiin ja ulkoisen verkon menetyksiin. Ulkopuolisen verkon menetyksiin luetaan tapahtumat, jossa sähkönsaanti menetetään vähintään neljäksi tunniksi. [12, s. 3]

6.4.6 Jälkilämmön poiston menetys

Vaikka suuri osa seisokkialkutapahtumien riskeistä pohjautuu nimenomaan jälkilämmön poiston menetykseen, voidaan jälkilämmön poiston menetys käsittää myös omana alkutapahtumanaan. Omana alkutapahtumanaan jälkilämmön poiston menetys vastaa 4 % seisokkitilojen sydänvauriotaajuudesta. Nämä alkutapahtumat liittyvät VF- ja RR-järjestelmien pumppujen toiminnan menetyksiin, inhimillisiin virheisiin, sähkövikoihin ja taakan pudotuksiin. [12, s. 3]

Alkutapahtumia, joiden on arvioitu voivan johtaa täydelliseen jälkilämmön poiston menetykseen, ovat seuraavat [10, s. 30]:

- Höyryputken katko suojarakennuksen sisäpuolella
- Höyryputken katko suojarakennuksen ulkopuolella ennen eristysventtiiliä
- Höyryn varo-, (ulospuhallus- tai ohitus)venttiilin auki juuttuminen
- Syöttövesivuoto höyrystimen ja ensimmäisen takaiskuventtiilin välissä
- Syöttövesivuoto ensimmäisen ja toisen takaiskuventtiilin välissä
- Höyryputken vuodot
- Syöttövesitankin vuodot
- Jälkilämmönpoistolinjan vuodot
- Raskaan taakan pudotus

6.4.7 **Korkea merivesi**

Seisokin aikainen ylikorkea meriveden pinta käsittää 2 % seisokin sydänvaurioriskistä. Mikäli meriveden pinta nousee poikkeuksellisen korkealle, se voi aiheuttaa uhan turvallisuusjärjestelmien toiminnalle. Laitos on suunniteltu kestämään +200 cm meriveden pinnan tason nousua. Mikäli merivesi nousee yli +200cm tason, mutta jää alle +300 cm, merivesi voi tunkeutua turbiinirakennukseen ja aiheuttaa pää- ja hätäsyöttövesijärjestelmien menetyksen. Jos merivesi nousee yli +300 cm tason, tulva leviää reaktorirakennukseen ja seurauksena voi olla hätäjäähdytyspumppujen menetys sekä pääkiertopumppujen tiivistevuoto. [10, s. 161]

Merentutkimuslaitos on selvittänyt meriveden pinnankorkeuden käyttäytymistä Suomenlahdella Loviisan edustalla. Ennusteissa on otettu huomioon kasvihuoneilmiön mahdollisesti meriveden pintaa nostava vaikutus. Meriveden pinnankorkeuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. Itämeren kokonaisvesimäärä, tuulten voimakkuus, seiche-ilmiö, ilmanpaine ja vuorovesi. Taajuuden meriveden pinnan nousulle yli tason +200 cm on arvioitu olevan noin $1{,}0 \cdot 10^{-3}$/a. [10, s. 161]

6.4.8 Paloriskit

Seisokin aikaiset tulipalot käsittävät 3 % seisokin sydänvaurioriskistä. Palojen aiheuttama riski perustuu niiden vaikutukseen sähkönsyöttöön ja sitä myötä jälkilämmön poiston ja turvallisuusjärjestelmien toimintaan. Merkittävimmät palokohteet riskin kannalta ovat tasa- ja vaihtosähkökeskukset sekä ulkoisen sähköverkon kytkennät. [12, s. 10]

6.5 Seisokkitilojen FSAR-analyysit

Loviisan FSAR:issa seisokkien aikaiset onnettomuusanalyysit on jaettu seisokkitilan mukaisesti kylmäseisokin, kuumaseisokin ja latausseisokin aikaisiin transientteihin.

Kuumalle seisokille on tehty seuraavat analyysit [68, s. 4]:

- Pieni primääripiirin jäähdytevuoto
- RR-jäähdytyksen menetys RR-pumpun pysähtymisen tai RR-linjan sulkuventtiilin virheellisen sulkeutumisen aiheuttamana
- Täydellinen vaihtosähkön menetys

Kylmälle seisokille on tehty seuraavat analyysit [69, s. 1]:

- Pieni primäärijäähdytteen menetys (TC-kollektorin kautta)
- Suuri primäärijäähdytteen menetys (kiertopiirin katko)
- RR-jäähdytyksen menetys (eristysventtiilien sulkeutuminen)

Latausseisokille on tehty seuraavat analyysit [70, s. 1]:

- Sammutetun reaktorin alikriittisyyden vaarantavat tapahtumat
- Jälkilämmön poiston menetys
- Primääripiirin vuodot (latausseisokissa)
- Perustilanteista poikkeavat latausseisokkitilanteet
- Raskaan esineen putoaminen avonaisen reaktorin päälle

6.5.1 Pieni primääripiirin jäähdytevuoto kuumaseisokissa

Kuumaseisokin vesi-vesi-vaiheen aikainen pieni primääripiirin jäähdytevuoto on analysoitu kahtena (42 cm^2 ja 60 cm^2) erikokoisena TC-kollektorin vuotona ja kylmähaaran putken vuotona (10 cm^2). TC-kollektorin vuodoilla ei ollut erikokoisesta vuotopinta-alasta huolimatta suuria eroja toisiinsa nähden. Molemmissa tapauksissa pystytään yhdellä TH-pumpulla syöttämään niin paljon vettä sydämeen, että tila saadaan stabiiliksi. Operaattoreiden tulee toimia seuraavassa järjestyksessä [68, s. 5-6]:

- Yrittää eristää vuoto
- Taata yhden TH-pumpun käynnissä pysyminen
- Varmistaa sumppikierron toiminta
- Taata jatkuva feed & bleed -jäähdytys sekä sumppikierron lämmönsiirto vuodon eristämisen epäonnistuessa
- Palauttaa RR-kierto purkamalla VF-eristys

Pienemmässä kylmähaaran vuodossa jäähdytteen menetys on niin hidasta, että operaattoreilla on 9 tuntia aikaa toimia. Myös tässä tapauksessa yksi TH-pumppu kykenee pitämään reaktorin vedenpinnan stabiilina. Tässä tapauksessa operaattoreiden tulee toimia järjestyksessä [68, s. 6-7]:

- Yrittää eristää vuoto
- Palauttaa RR-kierto purkamalla VF-eristys, mikäli RA-varoventtiili saadaan suljettua
- Taata yhden TH-pumpun käynnissä pysyminen
- Varmistaa sumppikierron toiminta
- Taata jatkuva feed & bleed -jäähdytys sekä sumppikierron lämmönsiirto vuodon eristämisen epäonnistuessa
- Taata höyrystimien syöttö hätäsyöttövesi- tai varahätäsyöttövesipumpuilla

6.5.2 Suuri primääripiirin vuoto kuumaseisokissa

Analysoitu alkutapahtuma on kiertopiirin kylmän haaran 2x100 % putkikatko kuuman seisokkitilan aikana jälkilämmönpoiston ollessa höyry-vesi-vaiheessa. Onnettomuus on analysoitu kahdella erilaisella variaatiolla: ensimmäisessä tapauksessa on yhden TH-pumpun lisäksi otettu käyttöön neljä TH-paineakkua, toisessa tapauksessa ainoastaan yksi TH-pumppu on toiminnassa paineakkujen ollessa eristettyinä. [68, s. 11]

Ensimmäisessä tapauksessa primääripiirin paine laskee katkon tapahduttua hyvin nopeasti 10 bariin. Paineakut kykenevät toimittamaan vettä reaktoriin melkein heti vuodon tapahduttua, joten primääripiirin lämpötila pysyy aisoissa. Yksi käyttökunnossa oleva TH-pumppu voidaan ottaa käyttöön heti kun sen nostokorkeus riittää. Kun TH-pumppu saadaan mukaan, voidaan jälkilämpöä poistaa feed & bleed -periaatteella. [68, s. 11]

Tapauksessa, jossa paineakut eivät ole käytettävissä kestää primääripiirin paineen alenemisessa TH-pumpun käyttöönotolle soveltuvaksi huomattavasti kauemmin kuin ensimmäisessä tapauksessa. TH-pumppaus pystytään tällöin aloittamaan vasta noin 250 sekuntia vuodon syntymisestä. Tämän seurauksena vedenpinta reaktorissa käy alimmillaan kolme metriä sydämen yläreunan alapuolella. Näin lyhyt sydämen paljastuminen ei kuitenkaan analyysien mukaan ehdi ylikuumentamaan polttoainetta paljoa, sillä veden kuohunta jäähdyttää myös paljastunutta osaa polttoaineesta. Kun TH-pumppauksella saadaan pinnankorkeus nostettua, voidaan jälkilämpöä poistaa feed & bleed -periaatteella ensimmäisen tapauksen tapaan. [68, s. 11-12]

Operaattoreiden toimenpiteet ovat seuraavat [68, s. 12]:

- Eristää vuoto (jos mahdollista)
- Varmistaa vähintään yhden TH-pumpun ja sumppikierron toiminta, mikäli vuodon eristäminen ei mahdollista,
- Jäähdyttää reaktoria feed & bleed -periaatteella ja taata sumppikierron lämmönsiirto pitkällä aikavälillä

6.5.3 RR-jäähdytyksen menetys kuumaseisokissa

Analysoituna alkutapahtumana on kuumaseisokin vesi-vesivaiheen aikainen RR-järjestelmän menetys tilanteessa, jossa vain toinen RR-piiri on käytettävissä. RR-järjestelmän menetetään joko RR-pumpun pysähtyessä tai sulkuventtiilin virheellisestä kiinnimenosta. Välitön seuraus tapahtumasta on lämpötilojen välitön nousu primääri- ja sekundääripiirissä. Mikäli primääripiirin luonnonkierto toimii, voi sekundääripiirin jäähdyte kiehua höyrystimessä noin 10 tunnin ajan, mikä antaa operaattoreille hyvin aikaa toimia. Operaattoreiden tulee toimia järjestyksessä [68, s. 7-9]:

- Käynnistää toinen RR-pumppu
- Ottaa käyttöön vara-RR
- RR-linjan otto käyttöön RL92/93D01 syöttöä varten
- Höyryn puhaltaminen RC-järjestelmästä lauhduttimeen, kunnes RR tai vara-RR saadaan käyttökuntoon
- Jatkaa höyry-vesi jäähdytystä kunnes yksi RR-pumppu saadaan toimintaan

6.5.4 Täydellinen vaihtosähkön menetys kuumaseisokissa

Analysoituna alkutapahtumana on kuumaseisokin vesi-vesivaiheen aikainen täydellinen vaihtosähkön menetys, jossa yhtäkään hätädieselgeneraattoria ei saada käynnistymään ja TE-uloslaskuventtiili pysyy auki, kunnes uloslaskuveden lämpötila saavuttaa arvon 120 °C. Analyysin mukaan jäähdytteen pinta paineistimessa aluksi laskee, mutta uloslaskun loputtua paineistimen pinta ja primääripiirin paine alkavat nousta lämpölaajenemisen seurauksena. Sekundääripiirin paine nousee lopulta niin korkeaksi, että RR11S03-varoventtiili avautuu ja jälkilämpöteho pääsee poistumaan tätä kautta. Höyrystimien kuivumiseen arvioidaan kuluvan aikaa ilman operaattoritoimenpiteitä n. 7,5 tuntia. Primääripiirin vesi laskee reaktorin sydämen yläreunan tasolle ajassa 8,6 tuntia. [69, s. 9]

Operaattoreilla on näin ollen hyvin aikaa korjaavien toimenpiteiden suorittamiseen. Operaattoreiden tärkein tehtävä olisi saada vähintään yksi dieselgeneraattori toimimaan,

jotta RR-jäähdytys saataisiin käynnistettyä. Mikäli yhtään dieseliä ei saada käyntiin, tulee yrittää ottaa käyttöön Ahvenkosken varasähköyhteys tai siirrettävä dieselgeneraattori. Lisäaikaa sähkön palauttamiselle saadaan käyttämällä RL94/97D01-pumppuja höyrystimien syöttöön, jolloin sekundääripuolella riittää vettä noin 20 tunniksi. [68, s. 10]

6.5.5 Pieni primääripiirin jäähdytevuoto kylmässä seisokissa

Pienen primääripiin jäähdytevuodon oletetaan tapahtuvan, kun jokin TC-kollektoriin putkistolla yhdistetty venttiili hetkellisesti puretaan suljetun venttiilin takana laitoksen ollessa kylmässä seisokkitilassa. Sulkuventtiili avataan virheellisesti, minkä seurauksena jäähdytettä pääsee vuotamaan ulos puretun venttiilin kautta. Tällainen vuototilanne on mallinnettu suoraan TC-kollektorille. [69, s. 3]

Analyyseja on tehty kahdella eri variaatiolla: CASE 1, jossa kaikki 37 säätösauvojen asentolähetintä on poistettu, ja CASE 2, jossa vain yksi asennonlähetin on poistettu. Molemmissa analyyseissa paineistimen PORV-puhallusventtiili (PORV, pilot operated relief valve, esiohjattu varoventtiili) YP-12S06 oli auki. [69, s. 3]

Analyysien perusteella CASE 1:ssä reaktorin vedenpinta laskee ilman operaattoritoimia tasolle +1 m sydämen yläreunasta kolmessa tunnissa. CASE 2:ssa tähän kuluu aikaa viisi tuntia. Pinnan lasku sydämen yläreunan tasalle kestää molemmissa tapauksissa ilman operaattoritoimia vähintään 17 tuntia, joten aikaa vuodon eristämiseksi on runsaasti. [69, s. 5-6]

Operaattorien tulee toimia seuraavassa järjestyksessä [69, s. 6]:

- Yrittää eristää vuoto
- Taata yhden TH-pumpun käynnissä pysyminen
- Varmistaa sumppikierron toiminta
- Taata jatkuva feed & bleed -jäähdytys sekä sumppikierron lämmönsiirto vuodon eristämisen epäonnistuessa

6.5.6 Suuri primääripiirin jäähdytevuoto kylmässä seisokissa

Suuressa primääripiirin vuodossa oletetaan kiertopiirin katkeavan kylmän haaran ja höyrystimen kylmän kollektorin yhtymäkohdasta laitoksen ollessa kylmässä seisokkitilassa. Vuodon oletetaan tapahtuvan siten, että vuotopurkaus tapahtuu täydellä voimalla katkon molemmilta puolilta, eli vuodon pinta-ala on tällöin 2x100 % kiertopiirin poikkipinta-alasta. [69, s. 4]

Katkon aiheuttajaksi oletetaan höyrystimen huoltokuilun kansi, joka putoaa kuiluun 10 metrin pudotuksella aiheuttaen putken katkeamisen. Analyysissa paineistimen PORV-puhallusventtiili YP-12S06 on auki ja säätösauvojen asennonlähettimiä on poistettuina kaikki 37 kappaletta. Analyysissa on käytetty kahta erilaista variaatiota: CASE 1, jossa operaattorit eivät tee mitään toimenpiteitä, ja CASE 2, jossa operaattorit käynnistävät yhden TH-pumpun 31 minuutin kuluttua onnettomuuden alusta. [69, s. 9]

CASE 1 johtaa reaktorin vedenpinnan laskuun sydämen yläpinnan tasolle noin viidessä tunnissa. CASE 2:n tapauksessa yksi TH-pumppu kykenee nostamaan vedenpinnan kuumahaaran tasolle hyvin nopeasti käynnistymisensä jälkeen. TH-järjestelmän vesivarannot kuluvat kuitenkin nopeasti, jos vettä valuu jatkuvasti vuotoon pumpun ollessa käynnissä. Tämän vuoksi TH-pumppua tulisi käyttää säännöstellen siten, että ei turhaan menetettäisi liikaa vettä vuotoon. Jos pumpun käyttöä pystytään ohjaamaan siten, että vain puolet pumpun syöttämästä vedestä menetettäisiin vuotoon, riittäisi TH-vettä noin 30 tunniksi. [69, s. 10]

Suuren primääripiirin vuodon aikana operaattoreilla on käytössä vähemmän aikaa pienempään vuotoon verrattuna. Tosin reaktorin pieni lämpöteho antaa tässäkin tapauksessa lisää reagointiaikaa. Operaattorien on toimittava järjestyksessä [69, s. 11-12]:

- Varmistaa sumppikierron toiminta
- Yrittää eristää vuoto
- Taata yhden TH-pumpun käynnissä pysyminen

- Taata jatkuva feed & bleed -jäähdytys sekä sumppikierron lämmönsiirto vuodon eristämisen epäonnistuessa

6.5.7 RR-järjestelmän menetys kylmässä seisokissa

RR-järjestelmän menetys on analysoitu kolmelle erilaiselle alkutapahtumalle. CASE 1:ssä oletetaan, että RR-järjestelmä menetetään, kun kummankin RR-piirin sulkuventtiilit (RR11S01 ja RR12S01) sulkeutuvat virheellisesti laitoksen ollessa kylmässä seisokkitilassa. Samalla menetetään myös RR-pumppu liian pienen virtaaman vuoksi. Alkutilanteessa paineistimen PORV-puhallusventtiili YP-12S06 on auki. Vara-RR järjestelmää ei tässä analyysissa otettu lainkaan huomioon. [69, s. 4]

CASE 1:tä on analysoitu useilla variaatioilla, jossa tilannetta analysoidaan muun muassa erilaisilla asennonlähettimien määrillä, erilaisilla RA-varoventtiilien toiminnoilla ja erilaisilla operaattoritoimilla. Operaattorien toimet aloitetaan variaatiosta riippuen joko yhden tai kahdeksan tunnin kuluttua alkutapahtumasta. [69, s. 4]

CASE 2:ssa RR-järjestelmä menetetään, kun RA-varoventtiilit juuttuvat 100 % auki-asentoon avautuessaan ensimmäisen kerran. Tällöin jäähdytteen lämpölaajeneminen sekundääripiirissä aiheuttaa venttiilien aukijuuttumisen. CASE 3:ssa alkutapahtumana toinen RA-varoventtiili juuttuu auki ja toinen toimii avautumispaineessa. [69, s. 4]

Operaattorien toimenpiteet CASE 1:ssä riippuvat variaatiosta. Neljässä variaatiossa operaattori purkaa RR-eristyksen yhden tunnin kuluttua alkutapahtumasta ja palauttaa RR-pumput toimintaan. Viidennessä variaatiossa RR-järjestelmä palautetaan vasta 8 tunnin kuluttua. Tällöin reaktorin vedenpinta on laskenut jo niin alas, että on tarpeen syöttää vettä reaktoriin myös TH-järjestelmällä. CASE 2:ssa ja 3:ssa operaattori purkaa RR-järjestelmän eristyksen ja palauttaa RR-pumpun yhden tunnin kuluttua alkutapahtumasta. [69, s. 17-19]

Analyysien perustella operaattorien on mahdollista estää sydämen ylikuumeneminen. Kaikilla eri variaatiolla laitos saadaan ajettua alkutapahtumaa edeltävään vakaaseen kylmäseisokkitilaan variaatiosta riippuen 6 – 16 tunnissa. Kaikissa analysoiduissa

tapauksissa myös polttoaineen lämpötilat pysyvät alhaisella tasolla. Matalan jälkilämpötehon ansiosta aikaviiveet tapahtumissa ovat pitkiä, joten operaattoreilla on runsaasti aikaa saada tilanne hallintaan. Lisäksi analyysin ulkopuolelle jätetty vara-RR parantaisi sydämen jäähdytysmahdollisuuksia entisestään. [69, s. 19-22]

6.5.8 Sammutetun reaktorin alikriittisyyden vaarantavat tapahtumat latausseisokissa

Reaktorin alikriittisyys voi vaarantua, mikäli primääripiirin jäähdytteen booripitoisuus pääsee laskemaan. Koko primääripiirin booripitoisuuden laimeneminen on hidas prosessi, jonka syntyminen edellyttää sitä, että tilanteen kehittyminen jää operaattoreilta havaitsematta. Primääripiirin vesimäärän ollessa 210 tonnia, on analysoitu, että jäähdytteen booripitoisuuden laimeneminen alikriittisyyttä uhkaavalle edellyttäisi puhtaan veden syöttämistä piiriin maksiminopeudella (65 t/h) yli tunnin ajan. Tällaiselle koko primääripiirin booripitoisuuden laimenemiselle on analysoitu seuraavat alkutapahtumat [70, s. 4-9]:

- Lämmönvaihtimien tai pumppujen kautta tapahtuvat laimenemiset
- Ioninvaihtimien käyttöönoton yhteydessä tapahtuvat laimenemiset
- Reaktorialtaan booripitoisuuden laimeneminen

Lämmönvaihtimien vuodoista aiheutuvaa laimenemista pidetään hyvin epätodennäköisenä, koska se edellyttäisi suuria vaurioita lämmönvaihtimen metallirakenteessa. Pumppujen kautta tapahtuva booripitoisuuden laimeneminen voi tapahtua TF-järjestelmään kytkettyjen pumppujen akseliboksin kautta, jos akselin tiivisteet pääsevät rikkoutumaan. Tällöin TF-järjestelmän booritonta vettä voi siirtyä primääripiirin veden sekaan ja aiheuttaa laimenemista. Tällainen laimeneminen voi tapahtua TH-, TG-, TE- ja TQ-pumpuissa. [70, s. 4-5]

Ioninvaihtimien aiheuttama riski primääriveden laimenemiselle perustuu siihen, että ioninvaihtimessa käytettyä hartsia ei virheellisesti olisi kyllästetty riittävästi boorilla ennen käyttöönottoa. Tällöin ioninvaihtimen läpi kiertävä booripitoinen vesi voi

laimentua huomattavasti. On analysoitu, että tämän seurauksena voi primääriveteen sekoittua 35 m^3 booritonta vettä. [70, s. 5]

Latausseisokin aikana reaktorin yläpuolella sijaitseva reaktoriallas on täytetty hätävesisäiliöstä TH00B01 otetulla booripitoisella vedellä. Polttoaineenvaihdon ajaksi reaktoriallas yhdistetään viereiseen polttoainealtaaseen avaamalla niiden välinen sulkuportti. Reaktoriveden laimeneminen on mahdollista, jos siihen valuu vettä ulkoisesta järjestelmästä (esimerkiksi palovesijärjestelmästä). Reaktorialtaan veden sekoittuminen sydämeen on mahdollista vain luonnonkierrolla. [70, s. 5-6]

Paikallisen matalan booripitoisuuden tulpan synnylle on analysoitu seuraavat alkutapahtumat [70, s. 6-9]:

- Säiliöiden käyttöönotot
- Puhtaan veden syöttö primääripiirin apujärjestelmiin
- Vesitetyn kiertopiirin käyttöönotto
- Hätäjäähdytysjärjestelmän koestukset

Eräiden säiliöiden virheellisestä käyttöönotosta voi seurata paikallista booripitoisuuden laimenemista. Näistä mainitaan kaasunpoistimet TK10/50N01, primääripiirin tyhjennyssäilö TE23B01 ja booriliuoksen varastointisäiliöt. Näiden aiheuttama laimenemisriski perustuu siihen, että säiliöihin saattaisi jäädä tai kertyä booritonta vettä. [70, s. 6]

Syötettäessä puhdasta vettä primääripiirin apujärjestelmiin on mahdollista, että jokin apuvesilinja jää virheellisesti auki. Tällöin on vaarana, että booritonta vettä siirtyy primääripiiriin. Virtaus on kuitenkin suurimmillaankin 18 kg/s. [70, s. 7]

On myös mahdollista, että booritonta vettä pääsee jostain suoraan kiertopiiriin. Tämä on mahdollista höyrystimen prise-vuodossa, jonkin laitteen jäähdytysveden letkuviasta tai koeponnistuksessa impulssiputkea pitkin. [70, s. 7]:

Hätäjäähdytysjärjestelmän kokeita tehdessä on periaatteessa mahdollista, että TH-paineakkujen tai hätävesisäiliön booripitoisuus on virheen vuoksi oletettua matalampi. [70, s. 7-8]

Polttoaineen käyttäytymistä kriittisyystilanteessa ei ole kuvattu muuten kuin toteamalla, että hyväksymiskriteerit täyttyvät. FSAR:in hyväksymiskriteerien mukaan paikallisen kriittisyyden seurauksena enintään 10 % polttoainesauvoista saa vaurioitua, eikä polttoaineessa saa tapahtua sulamista. [70, s. 14]

6.5.9 Jälkilämmön poiston menetys latausseisokissa

Lähtötilanteena laitos on latausseisokissa, jossa reaktorissa on polttoainetta ja reaktori- ja polttoainealtaan välinen portti on kiinni. Mahdollisia alkutapahtumia, joissa jälkilämmönpoistojärjestelmä RR voidaan menettää ovat esimerkiksi molempien RR-pumppujen vikaantuminen tai virheellinen sulkuventtiilien tai RA-eristysventtiilien sulkeutuminen. Myös VF-sivumerivesipiirin menetys sekä käytössä olevissa RL30- tai RL70-piireissä oleva passiivinen vika voi johtaa RR-järjestelmän menetykseen. [70, s. 10]

Mikäli jälkilämmön poisto menetetään, kestää altaiden veden lämpötilan nousu keskimääräisellä jälkilämpöteholla latausseisokin ylärajasta 70 °C:sta kiehumispisteeseen 100 °C:een noin 2 tuntia 14 minuuttia. Analyysissa oletetaan myös luonnonkierron ja kaiken lämmönsiirron sekundääripiiriin katkenneen. [70, p. 11]

Edellä mainituissa tapauksissa operaattoreiden tulee ensisijaisesti ottaa käyttöön vara-RR-järjestelmä ja yrittää palauttaa normaali RR-järjestelmä takaisin toimintaan. Mikäli reaktori- ja polttoainealtaat olisi yhdistetty, olisivat aikaviiveet vastaavasti paljon suuremmat. [70, s. 11]

6.5.10 Primääripiirin vuodot latausseisokissa

Lähtötilanteena on latausseisokki, jossa reaktorialtaan ja polttoainealtaan välinen sulku on kiinni. Tällaiseen alkutilaan on analysoitu kolme erilaista primääripiirin vuotoa [70, s. 12]:

- TC-kollektorin kautta tapahtuva vuoto (vuodon koko 42 cm^2)
- Kylmähaaran instrumenttiputken kautta tapahtuva vuoto (3 cm^2)
- Huollossa olevan pääkiertopumpun jättämän aukon kautta tapahtuva vuoto (1932 cm^2)

Näistä vuodoista pääkiertopumpun aukon vuoto olisi ylivoimaisesti suurin. Siitä seuraisi reaktorikuilun tyhjeneminen latauspinnan tasolta (24,2 m) pääkiertopumpun laippatasolle (13,66 m) 3 minuuttia 52 sekuntia, mihin vuoto lopulta pysähtyisi. Pääkiertopumpun vuotoa pidetään erittäin epätodennäköisenä tapahtumana. [70, s. 12]

TC-kollektorin vuodossa kestää tapahtuman alusta siihen, että veden pinta laskee kylmähaaran alareunan tasolle (11,5 m) 3 tuntia 30 minuuttia. Vastaavasti instrumenttilinjan vuodossa siihen kuluu huomattavasti kauemmin, 43,3 tuntia. Molemmissa tapauksissa vuoto loppuu tähän, mutta kiehumisen takia veden pinnan lasku jatkuu. Kiehuminen laskee veden pinnan sydämen yläreunan tasolle 40 minuutissa ja 2 metriä sydämen alapuolelle tästä 50 minuutin jälkeen. [70, s. 12]

Tehtyjen analyysien perusteella voidaan todeta, että todennäköisimpinä pidetyissä vuodoissa (TC-kollektori ja instrumenttiputki) aikaviiveet ovat niin pitkät (useita tunteja), että aikaa vastatoimenpiteiden suorittamiseen on riittävästi. Vuodon korjaamisen ajaksi voidaan TH-järjestelmällä syöttää vettä reaktoriin ja hoitaa jäähdytys sumppikierron kautta. Mikäli sumppikierto ei ole käyttökunnossa ja jäähdytettä vuotaa höyrystintilaan, on vuoto pyrittävä pikaisesti eristämään suojarakennukseen. [70, s. 12-13]

6.5.11 Raskaan esineen putoaminen avonaisen reaktorin päälle latausseisokissa

Raskaan taakan putoaminen reaktorihallissa ei kuulu Loviisan laitosten suunnittelun perusteisiin, minkä vuoksi reaktorihallin +25.20 tason lattialaattaa ei ole mitoitettu kestämään raskaan komponentin putoamista. Raskaista nostoista aiheutuvat riskit on arvioitu todennäköisyyspohjaisesti. Onnettomuuksien välttämiseksi raskaiden esineiden kuljettaminen avonaisen reaktorin ylitse on kielletty. Kielto ei kuitenkaan koske reaktorin sisäosien purkua ja siinä tarvittavia nostovälineitä. [70, s. 14]

6.6 Seisokkitilojen TTKE

Loviisan TTKE:ssa on määritelty käyttörajoitukset ja käyttöehdot seisokin aikaisille käyttötiloille kuumaseisokki, kylmäseisokki ja latausseisokki. Tässä luvussa esitetään tärkeimmät ehdot ja rajoitukset edellä mainituille käyttötiloille.

6.6.1 Jälkilämmönpoistojärjestelmät RR ja vara-RR

Kuumassa seisokkitilassa jälkilämmön poiston TTKE-vaatimukset riippuvat siitä, onko lämmönsiirto höyrystimissä höyry-vesivaiheessa vai vesi-vesivaiheessa. Höyry-vesivaiheen aikana niin RR- kuin RL-järjestelmienkin molempien redundanssien tulee olla käyttökunnossa ja kahden höyrystimen kiertopiireineen tulee osallistua jäähdytykseen. Vesi-vesivaiheen aikana on muuten samat vaatimukset paitsi, että nyt riittää pelkästään kahden höyrystimen osallistuminen jäähdytykseen. [8]

Kylmässä seisokkitilassa molempien redundanssien RR-piirien tulee olla käyttökunnossa. Vähintään kahden höyrystimen kiertopiireineen tulee osallistua jäähdytykseen. Redundanssien ristiinkytkentä on sallittu. [7]

Latausseisokissa molempien redundanssien RR-piirien tulee olla käyttökunnossa. Redundanssit voidaan kytkeä ristiin. Yksi RR-pumppu ja yksi RR-lämmönvaihdin voivat olla samanaikaisesti huollon vuoksi poissa käytöstä mikäli vara-RR on käyttökunnossa tai reaktorialtaan pinnankorkeus on yli +24 m. Vaihtoehtoisesti RR-järjestelmän huolto on mahdollista myös, mikäli vara-RR on käyttökunnossa, reaktori

on ollut alikriittinen vähintään 7 päivää ja huomattava määrä (yli 100 nippua) polttoainetta on siirretty pois reaktorista. [6]

Lisäksi kuumassa ja kylmässä seisokkitilassa tulee ainakin yhden syöttövesisäiliön olla siinä kunnossa, että sitä voidaan käyttää RR-lämmönsiirtimien ja pumppujen välisen putkiston vian sattuessa RR-järjestelmän paisuntasäiliönä. [7] [8]

Vara-RR-järjestelmän molempien redundanssien tulee olla käyttökunnossa kaikissa seisokkitiloissa siten, että kumpikin redundanssi kykenee poistamaan syntyneen jälkilämmön. Kuuman seisokkitilan aikana tämä vaatimus pätee vain vesi-vesivaiheelle. [8]

6.6.2 Polttoainealtaan jäähdytysjärjestelmä TG

Kaikissa seisokin käyttötiloissa molempien redundanssien TG20- ja TG40-järjestelmien tulee olla käyttökunnossa ja vähintään toisen redundanssin tulee olla jatkuvasti toiminnassa kun reaktorialtaassa on polttoainetta. Polttoainealtaan veden pinnan tulee olla vähintään tasolla +17,25 m, kun altaassa on polttoainetta. Jäähdytteen booripitoisuuden tulee olla 14 ± 1 g/kg. [8]

Huoltotöitä varten yhden TG-pumpun ja lämmönvaihtimen saa ottaa pois käytöstä sillä edellytyksellä, että jäljelle jäävien pumppujen sähkönsyöttö on varmistettu kahdella dieselgeneraattorilla. Tällöin polttoainealtaan veden tulee olla tasolla +24 m. Lisäksi putkiyhteyksien TH-järjestelmään tulee olla kunnossa siten, että altaan vettä voidaan jäähdyttää myös sitä kautta. Kuuman seisokin aikana toinen redundanssi saa olla pois käytöstä enintään 3 vrk. [8]

Latausseisokin aikana polttoainealtaan ja reaktorikuilun välinen portti saa olla auki polttoaineen siirtämistä varten. Muissa käyttötiloissa portin tulee olla suljettu. [6]

6.6.3 Hätäjäähdytysjärjestelmä TH

Kuumassa seisokkitilassa tulee TH-järjestelmän molemmissa redundansseissa olla käytettävissä ainakin yksi TH-pumppu. Molempien redundanssien TH-järjestelmän

lämmönsiirtimien TH20W0001 ja TH60W0001 tulee olla käyttökunnossa. Hätälisävesisäiliöön ja höyrystintilan kokoojakaivoihin kytkettyjen putkilinjojen (sumppikierto) tulee olla käyttökunnossa siten, että vettä voidaan tarvittaessa syöttää reaktoriin. Molempien redundanssien minimikiertolinjojen tulee olla käyttökunnossa. [8]

Kylmässä seisokkitilassa vaaditaan kahden joko samasta tai eri redundansseista olevan TH-pumpun olevan käyttökunnossa. Tämän lisäksi hätälisävesisäiliössä tulee olla vähintään 740 m^3 booripitoista (14 g/kg) vettä. [7]

Latausseisokin aikana polttoainealtaan ja reaktorikuilun välisen portin ollessa kiinni tulee kahden TH-pumpun (joko samasta tai eri redundansseista) olla käyttökunnossa. Mikäli altaiden välinen portti on auki ja veden pinta yli +24m, ei TH-järjestelmän hätälisäveden syötölle ole vaatimuksia. Jos polttoaine on siirretty pois reaktorista ja TG-järjestelmän molemmat redundanssit ovat käyttökunnossa, ainoat vaatimukset TH-järjestelmälle ovat TH-paineakkujen käyttökuntoisuudet. [6]

6.6.4 Varahätäsyöttövesijärjestelmä RL94/97

Kuumassa seisokkitilassa tulee molempien redundanssien RL94/97 varahätäsyöttövesijärjestelmien olla käyttökunnossa siten, että niillä pystytään syöttämään vettä vähintään kahteen höyrystimeen. Muissa seisokkitiloissa varahätäsyöttöjärjestelmälle ei ole käyttökuntoisuusvaatimuksia. [8]

6.6.5 Välijäähdytysjärjestelmä TF

Kuumassa seisokissa TF-järjestelmän kummassakin redundanssissa tulee olla vähintään yksi toimiva pumppu ja lämmönvaihdin. Järjestelmän tulee olla sellaisessa kunnossa, että sillä pystytään jäähdyttämään TH-, TG-, ja TQ-lämmönvaihtimia. [8]

Kylmässä seisokkitilassa ja latausseisokissa tulee olla käytettävissä yhteensä vähintään kaksi TF-järjestelmän pumppua ja lämmönsiirrintä joko samassa tai eri redundansseissa. Järjestelmältä vaaditaan TH-, TG-, ja TL-lämmönvaihtimien jäähdytyskykyä. [7]

Kaikissa seisokkitiloissa järjestelmän huollon aikana tulee vähintään yhden pumpun ja lämmönsiirtimen olla käyttökunnossa (kuumassa seisokissa molemmissa redundansseissa). [8]

6.6.6 Sivumerivesijärjestelmä VF

Kuumassa seisokkitilassa vaaditaan, että molemmissa redundansseissa tulee olla vähintään yksi käyttökuntoinen VF-pumppu. [8]

Kylmässä seisokissa ja latausseisokissa riittää, että molemmissa redundansseissa on yhteensä kaksi käyttökuntoista pumppua. Kylmässä seisokissa ja latausseisokissa redundanssien ristiinkytkentä on myös sallittu [7]. VF-järjestelmää koskevat huoltorajoitukset ovat vastaavat kuin TF-järjestelmällä. [6]

6.6.7 Laitoslisävesijärjestelmä RV

Kaikissa seisokkitiloissa tulee vähintään toisen lisävesisäiliöistä 10RV01B0001 tai 10RV01B0003 olla täytettynä vähintään pinnankorkeuteen +2700 mm asti vedellä, jonka lämpötila on vähintään 50 °C. [6]

Kuumassa seisokkitilassa vaaditaan molempien redundanssien olevan käyttökunnossa [8]. Muissa seisokkitiloissa riittää, että toinen redundanssi on käyttökunnossa. Redundanssit voidaan kytkeä ristiin. Kylmän seisokin ja latausseisokin aikana voidaan toinen redundanssi erottaa huollon ajaksi. [7]

6.6.8 Alikriittisyyden varmistaminen

Alikriittisyyden varmistamiseksi primääripiirin booripitoisuuden tulee kaikissa seisokkitiloissa olla 14 ± 1 g/kg. Vähintään yhden suuritehoisen TB-järjestelmän pumpun tulee olla käyttökunnossa siten, että väkevää booriliuosta pystytään tarvittaessa ruiskuttamaan reaktoriin. TB-järjestelmän säiliöissä tulee olla vähintään 25 m^3 booriliuosta, jonka väkevyys on vähintään 30 g/kg. Puhtaan tai vähäboorisen (booripitoisuus < 13 g/kg) veden pääsy primääripiiriin on estettävä erottamalla primääripiiri mahdollisista puhtaan lauhteen lähteistä. [7]

Kuumasta seisokkitilasta laitosta ylösajaessa on ensimmäiseksi käynnistettävä ne pääkiertopumput, joiden kiertopiireissä on seisokin aikana käytössä luonnonkierto. Muut kiertopiirit tulee huuhdella ennen pääkiertopumppujen käynnistämistä. [8]

Kylmä- ja kuumaseisokkitiloissa saa enintään yksi säätösauva kerrallaan olla nostettuna ylös sydämestä. [7]

6.6.9 Huonetilojen ilmastointi / jäähdytys

TTKE:ssa esitetään vaatimuksia ilmastoinnin toiminnalle eri huonetiloissa ja järjestelmissä. Vaatimukset ovat lähestulkoon samat kaikille kolmelle seisokkitilalle. Ilmastoinnin ja jäähdytyksen on oltava käyttökunnossa seuraavissa tiloissa [8]:

- Hätäsyöttövesihuoneet (UW23)
- TF-pumppuhuone (TL45)
- Valvomon hätäilmastointi (UV21)
- Laboratoriorakennuksen sähkölaitetilat (UV13, vain kuumaseisokki)
- Valvomorakennuksen kojetilat ja päävalvomo (UV23, UV25)
- Kytkinlaitos (UV26)
- Hätädieselgeneraattorien huonetilat (11UW51, 11UW52, 12UW53, 12UW54)
- Suojarakennuksen alipaine- ja suodatusjärjestelmät (TL22, TL23)
- Valvotun alueen ilmastointijärjestelmät (TL40, vain kuumaseisokki)
- Hätäjäähdytyspumppuhuoneiden ilmajäähdytysjärjestelmä (TL41, vain kuumaseisokki)
- Polttoaineen pumppuhuoneen jäähdytysjärjestelmä (TL42)
- TB-pumppuhuoneiden ilmajäähdytysjärjestelmä
- Vara-RR-järjestelmä (UW94)

6.6.10 Sähkönsyöttö

Kuuman seisokin aikana laitoksen tulee olla yhdistettynä valtakunnan sähköverkkoon sekä 440 kV että 110 kV yhteyksillä. Lataus- ja kylmäseisokeissa riittää, että 440 kV ja 110 kV sähköyhteyksistä toinen on käyttökunnossa. [7]

Dieselgeneraattoreista tulee olla käyttökunnossa apujärjestelmineen vähintään kaksi. Kuumaseisokissa näiden kahden dieselin tulee olla eri redundansseista. Mikäli kaksi toimivaa dieseliä ovat molemmat samasta redundanssista, tulee osalle dieselvarmennetuista pumpuista kytkeä väliaikainen sähkönsyöttöyhteys, koska ne jäisivät muuten ilman dieselvarmennusta. Kunkin dieselgeneraattorin päiväsäiliössä tulee olla vähintään 3,8 m^3 polttoainetta. [8]

Käyttökunnossa olevia dieselgeneraattoreita vastaavien 6 kV ja 0,4 kV varmennettujen ja varmentamattomien kytkinlaitosten ja 220 V ja 24 V tasasähkökeskusten tulee olla käytettävissä. [7]

Yhden epäkunnossa olevan dieselgeneraattorin, jonka vaadittaisiin olevan käyttökunnossa, saa korvata Ahvenkoski-yhteydellä, mikäli seuraavat ehdot täyttyvät [7]:

- Ahvenkoski-yhteys saadaan toimimaan käynnistysvalmiudeltaan vastaavaksi kuin korvattava dieselgeneraattori
- Ahvenkoski-yhteyttä voidaan käyttää vain satunnaisesti vikaantuneen dieselgeneraattorin korvaamiseen – ei sallita määräaikaishuolloissa käytettäväksi
- Epäkunnossa oleva dieselgeneraattori on korjattava ja palautettava takaisin käynnistysvalmiuteen mahdollisimman nopeasti

6.6.11 Palontorjunta

Palontorjuntaa koskeva TTKE on yhteinen kaikille käyttötiloille. Sen mukaan palontorjuntaan kuuluvat seuraavat laitteet ja järjestelmät [9]:

- Paloilmoitinjärjestelmä MF

- Palonsammutusjärjestelmät UJ, UX
- Palovesijärjestelmät UJ91, UJ30 sekä 10UA10B0001 ja 10UA10B0002
- Alkusammuttimet
- Palo-osastointi
- Savunpoistojärjestelmät UX

TTKE:n mukaan palontorjuntaan kuuluvien järjestelmien tulee olla jatkuvasti käyttökunnossa. UJ-järjestelmän palopumppujen tulee olla yhdistettynä kalliovesisäiliöihin 10UA10B0001 ja 10UA10B0002, joiden sisältämän vesimäärän tulee olla vähintään 1400 m^3. Mikäli jokin palontorjuntaan liittyvä laite tai järjestelmä vikaantuu, se tulee korjata mahdollisimman pian. Lisäksi on huolehdittava korvaavilla menettelyillä, että paloturvallisuustaso säilyy riittävänä myös vian korjauksen aikana. [9]

6.6.12 Kuumaseisokkiin liittyvät erityisvaatimukset

Primääripiirin ylipaineistumisen varalta kuumaseisokin aikana tulee molempien paineistimen varoventtiilien olla käyttökunnossa, siten että molemmissa on vähintään kaksi toimivaa ohjausventtiiliä. Myös paineistimen suurikapasiteettisten ulospuhalluslinjojen (4 kpl.) tulee olla käyttökunnossa. Paineistimen varoventtiili saa olla epäkäytettävissä enintään tunnin ajan, muuten laitos tulee ajaa kylmäseisokkiin. [8]

Kuumaseisokin aikana pääkiertopumpuista enintään viisi saa olla käynnissä, jotta paine-ero reaktorisydämen yli ei kasvaisi sallittua suuremmaksi. [8]

Suojarakennuksen tiiveyden tulee olla sellainen, että enintään 0,2 % suojarakennuksen ilmamassasta vuotaa vuorokaudessa suojarakennuksen paineen ollessa 0,17 MPa. Kulku reaktorihalliin on tehtävä ilmalukon kautta siten, että vain yksi ovi on auki kerrallaan. Materiaali-ilmalukon tulee olla kiinni. Tavarakuljetuksien aikana voidaan hetkellisesti avata yksi kerrallaan joko ilmalukon ulompi pystyovi tai vaakaluukku. Painesuojakuoren ilmatilan eristysventtiilien ja alipaineventtiilien on oltava kunnossa,

jotta suojarakennus voidaan tarvittaessa eristää. Suojarakennuksen paineen tulee olla 2–6 mbar alipaineessa ulkoilmaan verrattuna ja lämpötilan korkeintaan 60 °C. [8]

Reaktorin jäähdytteen lämpötilan muutosnopeus saa primääripiiriä jäähdyttäessä olla korkeintaan 20 °C/h ja lämmitettäessä 30 °C/h. Paineistimelle on erikseen määritelty jäähdytysnopeudeksi maksimi 40 °C/h ja lämmitykselle 30 °C/h. [8]

Sekundääripiirissä höyrystimien maksimijäähdytysnopeus on 30 °C/h ja lämmitysnopeus 20 °C/h. Höyrystimen täytön tulee kestää vähintään 3 tuntia siirryttäessä vesi-vesijäähdytykseen. Höyrystimen sekundääripuolen paineen on oltava alle 20 bar höyrystimen metallin lämpötilan ollessa alempana kuin 55 °C. Näillä rajoituksilla suojellaan höyrystintä lämpötilan aiheuttamilta rasituksilta. [8]

6.6.13 Kylmäseisokkiin liittyvät erityisvaatimukset

Primääripiirin ollessa paineistetussa tilassa tulee ylipaineistumisen välttämiseksi varmistaa, että painehätävesisäiliöiden (paineakkujen) ja korkeapainehätävesilinjojen venttiilit ovat kiinni ja että seisokkivaroventtiili 10YP12S0041 ja ainakin yksi päävaroventtiili ovat käyttökunnossa ja yhdistettynä paineistimeen. [7]

6.6.14 Latausseisokkiin liittyvät erityisvaatimukset

Polttoaineen vaihtolatauksen saa aloittaa aikaisintaan 72 tuntia alikriittisyyden saavuttamisen jälkeen. Latauskoneen ja muiden polttoaineenvaihdossa tarvittavien laitteiden tulee olla käyttökunnossa. Polttoaineelle tulee olla varattuna niin paljon allastilaa, että reaktorin evakuointi kaikesta polttoaineesta on mahdollista. Reaktorin jäähdytysveden booripitoisuuden tulee olla 14 ± 1 g/kg ja veden pinnan yli tason +24 m. Puhelinyhteyden latauskoneen kuljettajan ja valvomon välillä tulee toimia. Polttoainealtaiden yläpuolella on muiden kuin polttoaineen käsittelyssä vaadittavien raskaiden tavaroiden kuljettaminen kielletty. [6]

Vähintään kolmen neutronivuon mittauskanavan tulee olla kunnossa. Suojarakennuksen tiiveyttä koskevat samat vaatimukset kuin kuumaseisokin aikana. Suojarakennuksen

alipaineen ylläpitoa ja radioaktiivisten aineiden suodatusta varten tulee voida käyttää vähintään yhtä TL23- ja TL22-järjestelmän tulo- ja poistolinjaa ja suodattimia. [6]

Latausseisokin aikana tilanteessa, jossa kaikki polttoaineniput on siirretty polttoainealtaaseen, voidaan lieventää eräiden järjestelmien kunnossaolovaatimuksia. Tällöin kunnossaolovaatimuksia ei sovelleta RR-, TB- ja RV-järjestelmille eikä hätäsyöttöpumppujen jäähdytykselle. [6]

6.7 Häiriö- ja hätätilanneohjeet

Seuraavista seisokin aikaisista tapahtumista on laadittu häiriö- tai hätätilanneohjeet. Samoin kuin Olkiluodon tapauksessa näiden ohjeiden lisäksi on olemassa ohjeita, jolle alkutilaa ei ole erikseen määritetty, mutta joita voidaan käyttää myös seisokkitiloille. Loviisassa häiriöohjeita kutsutaan häiriönselvitysohjeiksi. Sisällöltään ne ovat kuitenkin vastaavat kuin esimerkiksi Olkiluodon häiriöohjeet.

- Häiriönselvitysohje: Jälkijäähdytyksen menetys kylmässä seisokissa
- Häiriönselvitysohje: Polttoainealtaan jäähdytysjärjestelmän TG20 ja TG40 samanaikainen vikaantuminen
- Häiriönselvitysohje: Laitoksen täydellinen ulkoisen sähkönsyötön menetys
- Häiriönselvitysohje: Alijäähtyminen (Suppo), levä, öljy
- Hätätilanneohje: Polttoaineen käsittelyonnettomuus tai raskaan esineen putoaminen polttoainealtaaseen tai reaktoriin

6.7.1 Jälkijäähdytyksen menetys kylmässä seisokissa

Alkutilana on kylmä seisokki tai latausseisokki, jossa jälkilämpöä poistetaan kahdella höyrystimellä vesi-vesi-lämmönsiirrolla. YC/YQ-ulostulolämpömittaukset eivät ole käytettävissä. Alkutapahtumana on joko primääripiirin luonnonkierron menetys tai RR-järjestelmän menetys. Alla on lueteltu ohjeessa käsitellyt erilaiset variaatiot alkutapahtumasta [32]:

- Luonnonkierron menetys reaktorin ollessa avattuna (RR-järjestelmä kunnossa)

- Luonnonkierron menetys reaktorin ollessa suljettuna (RR-järjestelmä kunnossa)
- RR-järjestelmän menetys reaktorin ollessa avattuna
- RR-järjestelmän menetys reaktorin ollessa suljettuna
- RR-järjestelmän menetys reaktorin ollessa suljettuna ja paineistuksen ollessa mahdotonta

Tilanteessa, jossa primääripiirin luonnonkierto menetetään reaktorin kannen ollessa auki, ensimmäinen toimenpide on tarkistaa RR-järjestelmän toiminta. Syötettävän RR-veden lämpötilan tulisi olla lähellä kylmän haaran lämpötilaa. Mikäli RR-vesi on liian kylmää (lämpötilaero yli 10 °C), tulee VF-piirin virtausta vähentää. Mikäli vain toinen kiertopiiri on ollut luonnonkierrolla, tulee myös varalla oleva kiertopiiri asettaa luonnonkierrolle. Mikäli luonnonkiertoa ei saada muuten aikaan, vähennetään kylmähaaran virtausta sulkemalla venttiiliä siten, että se jää auki 20 %. [32]

Jos edellä mainituista toimenpiteistä huolimatta luonnonkiertoa ei saada aikaan, on kiertopiireissä todennäköisesti kaasua, joka estää luonnonkierron synnyn. Kaasu voidaan poistaa ilmaamalla kiertopiirit. Ilmaus suoritetaan eristämällä luonnonkiertoon halutun kiertopiirin molemmat pääsulkuventtiilit ja nostamalla kiertopiirin paine TE-pumpulla 4 – 5 bariin ja ilmaamalla höyrystimen kollektorit ja pääkiertopumpun pesä. Mikäli ilmaus on onnistunut, pitäisi luonnonkierron nyt toimia. [32]

Mikäli luonnonkierto menetetään reaktorin kannen ollessa suljettuna, tulee ensimmäiseksi tarkistaa paineistimen pinnan korkeus, jonka tulee olla vähintään 1 m. Jos pinta on alempana, tulee pintaa välittömästi nostaa. Tämän jälkeen tarkistetaan RR-järjestelmän toiminta ja lämpötila samoin kuin toimittaessa kannen ollessa kiinni. Jos edellä mainituilla toimenpiteillä ei saada luonnonkiertoa toimimaan, on seuraava askel ryhtyä nostamaan hiljalleen primääripiirin painetta, kunnes luonnonkierto alkaa toimia. Samalla suoritetaan luonnonkiertopiirien kollektorien ilmaus. Mikäli paine ylittää 10 bar ilman luonnonkierron syntymistä, tulee luonnonkiertopiirien pääkiertopumput ottaa käynnistysvalmiuteen, ja käynnistää ne paineen ollessa 25 bar. Paine ei saa missään vaiheessa ylittää 30 baria. Pumppujen ollessa käynnissä suoritetaan

kaasunpoistokierrätystä kunnes kaasupitoisuus saadaan riittävän alhaiselle tasolle. Tämän jälkeen sammutetaan pääkiertopumput ja seurataan luonnonkierron palautumista. Mikäli luonnonkierto ei palaudu, suoritetaan primääripiirin paineen nosto uudelleen. [32]

Tilanteessa, jossa sekä RR- että vara-RR-järjestelmät on menetetty reaktorikannen ollessa auki, tulee veden pinta reaktorialtaassa nostaa latausaltaan tasolle ja avata niiden välinen portti. Tällöin jälkilämmön poistoon voidaan käyttää polttoainealtaan jäähdytysjärjestelmää TG. Altaiden veden lämpötilaa tulee tarkkailla ja tarvittaessa säätää TF-piirin välijäähdytystä. Tarvittaessa myös TH-järjestelmää voidaan käyttää osana jälkilämmönpoistoa, mikäli TG20-järjestelmä ei ole käytettävissä. [32]

Reaktorikannen ollessa kiinni ei TG-järjestelmällä jäähdyttäminen ole mahdollista. Nyt on kuitenkin mahdollista puhaltaa höyryä ulos sekundääripiiristä ja aikaansaada luonnonkiertojäähdytys reaktoriin. Ensimmäinen toimenpide tässä tilanteessa on kahden luonnonkierrossa olevan höyrystimen vesittäminen pintaan 3 m, jolloin voidaan siirtyä höyrystimen vesi-höyry lämmönsiirtoon. Samalla tulee vesittää myös höyryputket ja valmistella RA-tukkien käyttöönotto. Seuraavaksi aletaan hiljalleen nostaa primääripiirin painetta boin 20 bariin asti. Höyrystimiin tulisi muodostua höyrypatja, jonka paine on noin 5 bar. Syntynyt höyry johdetaan höyrynkuluttajille (RQ- ja TN-järjestelmien kuluttajat, käynnistysejektorit, RA-ulospuhallus, RA-varoventtiilit). Höyrystimen vesipintaa voidaan säätää hätäsyöttövesipumpuilla. Kun jäähdytys on saatu luotettavasti toimimaan, voidaan aloittaa toimenpiteet RR-järjestelmän saattamiseksi takaisin kuntoon. [32]

Mikäli reaktorin kansi on paikallaan, mutta primääripiiri ei siitä huolimatta ole tiivis, ei jäähdytys ulospuhaltamalla höyryä primääripiiristä ole mahdollista. Mikäli paikallaan olevassa reaktorin kannessa on riittävä vuotoreitti, voidaan yrittää saada jäähdytyskierto aikaan pumppaamalla reaktorikuiluun vettä TH-pumpuilla ja kierrättää vettä takaisin TH-vesisäiliöön TG-53:n avulla. Toinen vaihtoehto on uloslaskuttaa vettä reaktorista TE-järjestelmällä. Uloslaskutettu vesi jäähdytetään tällöin TE-lämmönvaihtimissa ja

pumpataan TK10- ja TC10-piirien kautta takaisin reaktoriin. Seuraava vaihtoehto on saada luonnonkierto toimimaan joko varahätäsyöttövesijärjestelmällä RL94/97 tai TK-RY-kytkennällä. [32]

6.7.2 Polttoainealtaan jäähdytysjärjestelmien TG20 ja TG40 samanaikainen vikaantuminen

Polttoainealtaan jäähdytyksen menettämisohjetta voidaan soveltaa niin tehoajon kuin seisokinkin aikana. Alkutapahtumana laitoksen polttoainealtaan molemmat jäähdytyspiirit (TG20 ja TG40) ovat vikaantuneet siten, että niiden nopea palauttaminen käyttökuntoon ei ole mahdollista. Ohjeessa esitetään toimenpiteet, joiden avulla polttoainealtaan lämpötila saadaan pidettyä alle 70 °C:ssa käyttämällä korvaavaa jäähdytystä. [29]

Polttoainealtaassa olevan polttoaineen tuottama jälkilämpöteho vaihtelee välillä 4 MW - 0,25 MW riippuen siitä kuinka kauan altaassa olevien nippujen alasajosta on kulunut ja kuinka suuri osa sydämen nipuista on tuotu polttoainealtaaseen. Suurimmillaan jälkilämpöteho on heti reaktorin alasajon jälkeen. Tällöin polttoainealtaan jäähdytteen lämpötilan kasvunopeus on n. 9 °C/h. [29]

Ensimmäinen toimenpide menetettäessä molemmat TG-pumput on keskeyttää mahdollisesti käynnissä olevat polttoaineensiirrot. Kunnossapidon tulee tehdä arvio, kuinka pitkään vähintään toisen pumpun palauttaminen kestäisi. Turvallisuusinsinöörien on tehtävä arvio polttoainealtaan jälkitehon aiheuttamasta lämpötilan nousun nopeudesta ja selvitettävä mitä mahdollisuuksia on korvaaviksi jäähdytystavoiksi. [29]

Mikäli toisen TG-piirin virtaustiet ovat käytettävissä, voidaan suorittaa jäähdytyskierto TM-järjestelmän kautta. Tällä tavoin saadaan aikaan 11–15 kg/s jäähdytysvirtaus, minkä pitäisi riittää kaikissa tilanteissa pitämään polttoainealtaan veden alle 70 °C lämpötilassa. Lämpötilan kehittymistä on kuitenkin seurattava tarkasti. [29]

Mikäli TG-piirin kumpaakaan virtausreittiä ei pystytä hyödyntämään, otetaan käyttöön jäähdytyskierto, jossa TG10D01-pumpulla pumpataan TH00B01-säiliöstä jäähdytettä

polttoainealtaaseen ja siitä ylivuotona takaisin TH00B01-säiliöön. TH00B01-säiliötä jäähdytetään TH-koestuskierrolla. Riippumatta siitä kumpaa varajäähdytystapaa käytetään, tulee normaali TG-jäähdytys saada palautettua mahdollisimman nopeasti. [29]

6.7.3 Laitoksen täydellinen ulkoisen sähkönsyötön menetys

Häiriöohje koskee tilannetta, jossa ulkoinen sähkönsyöttö menetetään täydellisesti laitoksen ollessa joko tehoajolla, alikriittisessä tilassa tai latausseisokissa. Ulkoisen sähkönsyötön täydelliseksi menetykseksi lasketaan tapahtumat, jossa ulkoisten 110 kV ja 400 kV yhteyksien katkettua lisäksi käytössä olevan laitoksen turbiinin omakäyttöajo ei onnistu. Laitos saa tällöin sähköä ainoastaan dieseleiden avulla. [21]

Kun laitoksella menetetään yhteys ulkoiseen sähköverkkoon, tulisi varasähköä tuottavien dieselien käynnistyä automaattisesti ja palauttaa jännitteet 6 kV ja 0,4 kV dieselkiskoihin 14 sekunnin kuluessa. Jos käyttötilana on kylmä- tai latausseisokki, ja sähkönsyöttö on vain yhden dieselin varassa, tulee aloittaa Ahvenkoski-yhteyden käyttöönottovalmistelut. Kuumassa seisokkitilassa Ahvenkoski-yhteyden valmistelu tulee aloittaa, jos sähkönsyöttö on kahden dieselin varassa. [21]

Ahvenkoski yhteyden lisäksi laitoksille on mahdollista tuottaa sähköä uudella EY-07-varavoimadieselillä, joka tuotiin laitosalueelle korvaamaan siellä aiemmin ollutta Fingridin kaasuturbiinia. [21]

Operaattorien tärkeimpinä toimenpiteinä on varmistaa dieselien sähkönsyöttö ja pyrkiä palauttamaan ulkoiset sähköyhteydet. [21]

6.7.4 Alijäähtyminen (suppo), levä öljy

Ohjeessa käsitellään tilannetta, jossa meriveden käyttö laitoksen jäähdytykseen estyy alijäähtymisen (supon), levän tai öljyn tukkiessa meriveden virtauksen VC- ja VF-pumppujen imupuolelle. Tällainen tilanne voi syntyä, mikäli suppoa tai epäpuhtauksia

(levä, öljy) pääsee meriveden tulokanavan aaltoilutilaan tukkimaan siellä olevat koriketjusuodattimet. [31]

Mikäli ongelmat rajoittuvat ainoastaan meriveden tulopuolelle, voidaan meriveden otto kääntää poistopuolelle. Mikäli myös poistopuoli on menetetty tai sitä ei muusta syystä voida ottaa käyttöön, tulee operaattorien aloittaa valmistelut siirtymiseksi sisäiseen jäähdytyskiertoon hätätilanneohjeen *LO1/LO2 välisen sisäisen jäähdytyskierron käynnistäminen* mukaisesti. [31]

6.7.5 Polttoaineen käsittelyonnettomuus tai raskaan esineen putoaminen polttoainealtaaseen tai reaktoriin

Hätätilanneohje käsittelee tilannetta, jossa latausseisokin aikana tapahtuu onnettomuus polttoaineen käsittelyn yhteydessä tai raskas esine putoaa polttoainealtaaseen tai reaktoriin. Ohjeessa annetaan operaattoreille ohjeet toimenpiteistä, joiden avulla [58]:

- Vältetään henkilövahingot,
- Eristetään onnettomuusalue ja estetään aktiivisuuden leviämisen
- Varmistetaan laitoksen turvallisuus
- Hälytetään apuvoimia

Onnettomuuden syntymisestä pitää välittömästi ilmoittaa päävalvomoon ja varmistaa, että kaikki suojarakennuksen sisällä olevat henkilöt poistuvat. Mikäli kyseessä on polttoaineen käsittelyonnettomuus, tulee tilan aktiivisuustaso ja mahdollinen aktiivisuuden leviäminen selvittää. Mikäli on aiheellista epäillä aktiivisuuden leviämistä, tulee suojarakennuksen ilmastointijärjestelmä eristää. Mikäli esine on pudonnut reaktoriin, tulee tarkkailla luonnonkierron toimivuutta. Jos esine on pudonnut polttoainealtaaseen, tulee aktiivisuusmittauksilla selvittää onko polttoaineesta vapautunut jalokaasuja tai jodia. [58]

Jatkotoimenpiteiden suunnittelua varten paikalle tulee kutsua ainakin päivystävä turvallisuusinsinööri, reaktori-insinööri, turvallisuusinsinööri, säteilysuojelupäällikkö ja

työsuojelupäällikkö. Heidän tulee laatia suunnitelma, jolla tilanne saadaan palautettua vakaaksi. [58]

7 JOHTOPÄÄTÖKSET OHJEIDEN KATTAVUUDESTA

Tässä luvussa esitetään johtopäätökset voimayhtiöiden laatimien seisokkitiloja koskevien häiriö- ja hätätilanneohjeiden kattavuudesta. Ohjeiden kattavuuden arvioinnissa suurin painoarvo oli PRA:ssa esitetyillä seisokkitilojen sydänvaurioriskeillä. Tapahtumista, joiden sydänvaurioriskiä pidetään merkittävänä, tulisi olla laadittuna kattavat ohjeet. PRA:n lisäksi ohjeita vertailtiin seisokkitilojen tapahtumista laadittuihin FSAR-analyyseihin ja seisokkitiloja koskeviin TTKE-ehtoihin.

7.1 Olkiluoto

Olkiluodossa merkittävimpänä seisokkitilojen aikaisena riskinä pidetään PRA:n mukaan jäähdytteen vuotoa. Merkittävimpänä vuotoalkutapahtumana riskin kannalta pidetään vuotoa pääkiertopumpun yhteestä. Tällaista vuotoa on käsitelty häiriöohjeessa *Reaktoripaineastian pohjavuoto polttoaineenvaihtoseisokissa*. Ohjeessa esitetään yksityiskohtaisesti toimenpiteet, joiden avulla reaktori voidaan vuodon sattuessa saattaa takaisin turvalliseen tilaan. Vuotoa pääkiertopumpun yhteestä on käsitelty kattavasti myös FSAR:issa. Lisäksi eräitä pienempiä vuotoja on käsitelty kattavasti häiriöohjeissa. Hätäjäähdytysjärjestelmiä käsittelevissä TTKE-vaatimuksissa ei havaittu puutteita. Kokonaisuutena vuotoalkutapahtumista laaditut ohjeet ja FSAR-analyysit ovat erittäin kattavat ja asianmukaiset.

Tulipalot ovat Olkiluodossa merkittävä seisokin aikainen riski. Suuri osa paloalkutapahtumista johtaa jälkilämmön poiston menetykseen, ja onkin tulkintakysymys kumpaan alkutapahtumaluokkaan ne luokitellaan kuuluvaksi. Tulipalojen aiheuttamia riskejä on arvioitu varsin kattavasti tulipaloja käsittelevässä PRA:ssa. Merkittävimpänä seisokin aikaisena paloalkutapahtumana pidetään sen mukaan paloa 321- ja 324-järjestelmien kaapelitiloissa. Paloista tehdyt FSAR-analyysit ja häiriöohjeet ovat sisällöltään varsin niukat. FSAR:in onnettomuusanalyyseissa palotapahtumia on käsitelty jälkilämmön poiston menetysten ja ulkoisen sähköverkon menetysten yhteydessä. Häiriöohjeita on tehty kahdesta eri palotapahtumasta: palosta dieseltilassa ja muuntajapalosta. Näissä esitetään ohjeet toimenpiteistä laitoksen tilan

vakauttamiseksi. Laitoksen palokunnan toiminnalle on lisäksi laadittu omat ohjeet, joissa esitetään sammutussuunnitelmat erilaisille palotilanteille laitoksen sisä- ja ulkoalueilla. Palontorjuntaa koskeva TTKE on asiallinen. Kokonaisuutena tulipaloja ja erilaisia paloalkutapahtumia tulisi esittää kattavammin häiriö- ja hätätilanneohjeissa, koska niiden aiheuttama riski on merkittävä ja niillä on merkitystä useiden turvallisuusjärjestelmien toiminnalle.

Jälkilämmön poiston menetyksiin on PRA:ssa liitetty kuuluviksi osa paloista ja sähkön menetyksistä, jotka voivat johtaa jälkilämmönpoistossa tarvittavien järjestelmien menetyksiin. Merkittävin riski jälkilämmönpoiston menetys -alkutapahtumista on 321- ja 324-järjestelmien samanaikaisella menetyksellä. FSAR:issa on analysoitu kattavasti erilaisia jälkilämmönpoiston menetykseen johtavia tapahtumia. Siinä on lisäksi esitetty erilaisia korvaavia tapoja jälkilämmönpoistoon, kun tavanomainen jälkilämmönpoisto on menetetty. FSAR:issa on mainittu yhtenä mahdollisena jälkilämmönpoistotapana jäähdytys rakennusten lämmitysjärjestelmän 763 avulla. 763-järjestelmä ei ole turvallisuusluokiteltu järjestelmä eikä sille ole määrätty vaatimuksia TTKE:ssa. Muilta osin jälkilämmön poistoa käsittelevä TTKE on asianmukainen. Jälkilämmönpoiston menetystä käsittelevät häiriöohjeet ovat myös pääasiassa asianmukaiset ja kattavat. Ohjeissa ei kuitenkaan ole käsitelty lainkaan tilannetta, jossa 321-järjestelmän jälkilämmön poisto menetetään reaktoripaineastian ollessa kiinni, jolloin 324-järjestelmän käyttö jälkilämmön poistoon ei ole mahdollista. Tällainen tilanne olisi syytä liittää ohjeistoon.

Paikallinen kriittisyysonnettomuus on PRA:n mukaan mahdollinen vain tilanteissa, jossa vähintään kaksi vierekkäistä säätösauvaa putoaa tai vedetään virheellisesti pois sydämestä, tai tilanteessa, jossa tuoretta polttoainetta ladataan paikkaan, jonka vierestä puuttuu vähintään yksi säätösauva. PRA:n mukaan kerkeän kriittisyyden todennäköisyys on äärimmäisen pieni ($1 \cdot 10^{-9}$/seisokki). Kriittisyysonnettomuuksista on FSAR:issa analysoitu tilanne, jossa polttoaineenvaihdon jälkeisen ylösajon aikana yksi säätösauva putoaa rikkoutuneen toimilaitteen takia sydämestä. FSAR:in analyysien mukaan polttoaineen eheys ei vaarannu missään odotettavissa olevassa

kriittisyysonnettomuudessa. Paikalliselle kriittisyysonnettomuudelle ei ole laadittu häiriö- tai hätätilanneohjetta. Kyseessä on hyvin harvinainen tilanne, josta ydinturvallisuudelle aiheutuva vaara on pieni. Tilanteesta aiheutuva erittäin poikkeava säteilytilanne tukee kuitenkin vaatimusta ohjeen laatimiselle. Reaktorin kriittisyyden hallintaa käsittelevä TTKE on asianmukainen.

Reaktoripainesäiliön kylmänä paineistuminen on erittäin harvinainen tapahtuma. PRA:ssa todetaan, että paineistuminen yli 9,3 MPa paineeseen voisi vaurioittaa reaktoripainesäiliötä. FSAR:in oletettujen onnettomuuksien laajennuksissa ei ole käsitelty paineastian murtumista, koska tapahtumaa pidetään erittäin epätodennäköisenä sen taajuuden ollessa $1 \cdot 10^{-11}$/a. Tapahtumasta ei ole laadittu erillistä häiriö- tai hätätilanneohjetta. Tapahtuman äärimmäisen harvinaisuuden vuoksi häiriö- ja hätätilanneohjeiden puuttuminen on hyväksyttävää. Reaktorin paineen seurantaan ja ylipaineen suojaukseen on kuitenkin laadittu ohjeita, joita noudattamalla pystytään välttämään kylmänä paineistuminen.

Merivesijäähdytyksen menetykseen johtavia alkutapahtumia ovat merivesikanavan sortuma tai tukkeutuminen supon tai roskien takia. Merivesijäähdytyksen menetyksistä on laadittu kolme häiriöohjetta, joissa kattavasti esitetään tilanteessa tehtävät korjaavat toimenpiteet. Jäähdytysvesikanavan tukkeuma on käsitelty myös FSAR:issa. Aiheesta laaditut ohjeet, analyysit ja TTKE ovat osin asianmukaisessa kunnossa. Tulisi kuitenkin harkita, onko tarkoituksenmukaista pitää kolmea sisällöltään lähes vastaavaa ohjetta. Nämä kolme ohjetta voisi hyvin yhdistää yhdeksi ohjeeksi esimerkiksi otsikolla *Merivesikanavan menetykseen johtavat tapahtumat*.

Sähkön menetys voidaan käsittää myös omana alkutapahtumanaan. Sähkön menetyksestä on laadittu hätätilanneohje, jossa kattavasti esitetään toimenpiteet, joiden avulla sähkönsyöttö voidaan palauttaa. Myös sähkönsyöttöä käsittelevä TTKE on asianmukainen.

Seuraavassa taulukossa on esitetty yhteenveto ohjeiden kattavuudesta.

Taulukko 14. Yhteenveto ohjeiden kattavuudesta.

Alkutapahtuma	PRA	FSAR	TTKE	Häiriö- / hätätilanneohjeet
Tulipalot	o	o	o	x
Jäähdytteen vuodot	o	o	o	o
Jälkilämmön poiston menetys	o	o	x	x
Kriittisyysonnettomuus	o	o	o	p
Sähkön menetys	o	o	o	o
Kylmänä paineistuminen	o	_	o	_
Raskaat nostot	o	_	o	_
Jäähdytysvesikanavan menetys	o	o	o	x

o = ohje kunnossa
_ = ohjetta ei laadittu, ei tarvetta laatia
x = ohjeessa havaittu puutteita / parannusehdotuksia
p= ohje puuttuu, tulisi laatia

7.2 Loviisa

Loviisan laitosyksiköillä merkittävimpänä seisokin aikaisena riskinä pidetään raskaan taakan putoamista. FSAR:in mukaan raskas esine voi pudota reaktorirakennuksen +25.20-tason lattian läpi ja aiheuttaa kiertopiirin katkon. FSAR:in mukaan raskaan esineen putoaminen reaktoriin tai polttoainealtaaseen voi johtaa polttoainevaurion ja radioaktiivisten fissiokaasujen leviämisen reaktorirakennukseen. Raskaita nostoja koskeva TTKE on asianmukainen. Raskaan taakan putoamisesta on laadittu hätätilanneohje, jossa käsitellään lähinnä henkilö- ja säteilyturvallisuuteen liittyviä asioita. Taakan putoamisen aiheuttamista jäähdytteen vuodoista on sen sijaan erikseen tehty kattavat ja asianmukaiset ohjeet. Kuitenkin myös erilaisia taakan putoamisia tulisi käsitellä ohjeissa monipuolisemmin omina alkutapahtuminaan. Nykyinen tilanne, jossa taakan putoamiset on yhdistetty vuotoalkutapahtumiin, aiheuttaa helposti sekaannusta. Olisi yksinkertaisempaa, jos taakan putoamisesta aiheutuvat vuodot esitettäisiin myös häiriö- ja hätätilanneohjeissa taakan putoamisina.

Primääripiirin booripitoisuuden laimeneminen voi johtaa reaktorin kriittisyysonnettomuuteen. FSAR:issa todetaan, että homogeeninen booripitoisuuden laimeneminen primääripiirissä on hyvin epätodennäköistä, koska suuren vesitilavuuden vuoksi laimeneminen edellyttäisi pitkäaikaista puhtaan veden pumppausta primääripiiriin suuritehoisella pumpulla. Paikallista booripitoisuuden laimenemista pidetään sen sijaan huomattavasti todennäköisempänä. Tällainen tilanne voi aiheutua mikäli puhdasta tai laimeaboorista vettä sisältävä ”tulppa” pääsee jostain primääripiiriin. FSAR:issa on kattavasti esitetty erilaisia tapahtumia, joissa ”tulppia” voi syntyä. Primääripiirin boorinhallintaa koskeva TTKE on asianmukainen.

Laimenemisonnettomuuden riskit perustuvat äkillisen tehonnousun aiheuttamiin polttoainevaurioihin. Primääripiirin booripitoisuuden laskusta aiheutuneen paikallisen kriittisyyden aiheuttamaa uhkaa ei pidetä laitoksen turvallisuuden kannalta merkittävänä, sillä analyysien mukaan polttoaineen tai suojakuoren lämpötilat eivät kohoaisi niin suuriksi, että merkittäviä polttoainevaurioita syntyisi. FSAR:in hyväksymiskriteerien mukaan boorin laimenemisen aiheuttamassa kriittisyydessä 10 %:ssa sauvoja voi tapahtua vauriota, mutta ei polttoaineen sulamista. Booripitoisuuden valvonnasta seisokissa on tehty tekninen pysyväisohje *Primääripiirin boorihappopitoisuuden valvonta seisokissa*, jonka tarkoituksena on ylläpitää yhtenäistä ja kattavaa booripitoisuuden valvontaa. Häiriö tai hätätilanneohjetta ei booripitoisuuden laimenemisesta ole tehty. Sellaisen laatiminen olisi kuitenkin perusteltua. Häiriö- tai hätätilanneohjeen voisi laatia nykyisen pysyväisohjeen pohjalta.

Primääripiirin vuoto -alkutapahtumia on analysoitu FSAR:issa kaikissa kolmessa eri seisokkitilassa (kylmä, kuuma ja latausseisokki). Analyyseja on tehty sekä pienille (reaktorin instrumentointi), keskisuurille (TC-kollektori), että isoille vuodoille (kiertopiiri, pääkiertopumppu). FSAR:in mukaan reaktorin jäähdytyksen takaamiseksi tarvitaan kaikissa vuototapauksissa vähintään yksi toimiva TH-pumppu, jonka sumppikierron välijäähdytys toimii. Tällöin saadaan taattua reaktorin jäähdytys feed & bleed -periaatteella. Hätäjäähdytystä koskeva TTKE on tältä osin asianmukainen. Seisokkitiloja varten ei ole tehty erillistä ohjetta primääripiirin vuodoille.

Häiriönselvitysohje *Primääripiirin vuoto* käsittää ainoastaan käyttötilat tehoajo, käynnistysvalmius ja kuumavalmius. Myös seisokkitilojen aikaisille vuodoille tulisi laatia omat ohjeet, koska muiden käyttötilojen vuotoja käsittelevät ohjeet ovat vain osittain käyttökelpoiset seisokkitiloille.

Seisokin aikaisesta sähkön menetyksistä on FSAR:issa analysoitu täydellinen vaihtosähkön menetys laitoksella kuumaseisokissa, joka on tilanteen kehittymisen kannalta pahin käyttötila. Myös sähkönsyöttöä koskeva TTKE on asianmukainen. Häiriönselvitysohjeessa *Laitoksen täydellinen ulkoisen sähköverkon menetys* kattaa kaikki käyttötilat. Ohjeessa kuvataan yksityiskohtaisesti millä toimenpiteillä sähkön saantia tulee yrittää palauttaa erilaisissa sähköverkon häiriöissä.

Loviisan PRA:ssa jälkilämmön poiston menetys on käsitelty myös omana alkutapahtumanaan. Jälkilämmön menetykseen voi johtaa useita muita alkutapahtumia, kuten raskaan taakan putoaminen tai sähkön menetys, ja jotkut niistä on käsitelty omina alkutapahtuminaan. FSAR:issa jälkilämmön poiston menetys on analysoitu kattavasti käsittäen käyttötilat kylmä seisokki, latausseisokki ja kuuma seisokki. Jälkilämmön poistoa käsittelevä TTKE on asianmukainen. Jälkilämmön poiston menetystä koskeva häiriönselvitysohje on tehty käyttötiloille kylmä seisokki ja latausseisokki. Siinä on annettu toimintaohjeet useiden erilaisten jälkilämmön poiston menetykseen johtavien alkutapahtumien varalle. Siinä esitetään erilasia ohjeita miten primääripiirin luonnonkierto voidaan palauttaa sekä vaihtoehtoisia tapoja poistaa lämpöä primääri- tai sekundääripiireistä. Jälkilämmön poiston menetys seisokin aikana on kokonaisuutena analysoitu hyvin monipuolisesti erilaisine variaatioineen ja siitä laaditut ohjeet ovat erittäin kattavat.

Öljyonnettomuudet ovat merkittävä riski Loviisassa. FSAR:issa öljyonnettomuutta ei ole suoraan analysoitu, mutta siinä on esitetty muita merivesipiirien menetykseen johtavia onnettomuuksia. Öljyonnettomuuden, supon tai levän aiheuttamista merivesijäähdytyksen menetyksistä on laadittu asianmukainen häiriöohje.

Korkeasta meriveden pinnasta on tehty hätätilanneohje, jossa kattavasti selvitetään miten erilaisissa merenpinnan nousuissa tulee toimia. Korkeasta meriveden pinnasta on lisäksi tehty kattava analyysi PRA:ssa.

Erilaisia tulipaloja on analysoitu kattavasti FSAR:issa. Merkittävimmistä paloista on myös laadittu asianmukaiset häiriö- ja hätätilanneohjeet. Laitospalokunnan toiminnasta on myös laadittu ohje. Palontorjunnasta laadittu TTKE on asianmukainen.

Seuraavassa taulukossa on esitetty yhteenveto ohjeiden kattavuudesta.

Taulukko 15. Yhteenveto ohjeiden kattavuudesta.

Alkutapahtuma	PRA	FSAR	TTKE	Häiriö- / hätätilanneohjeet
Raskaan taakan pudotukset	o	o	o	x
Laimennusriskit	o	o	o	p
Öljyonnettomuudet	o	_	o	o
Jäähdytteen vuodot	o	o	o	x
Sähkön menetys	o	o	o	o
Jälkilämmön poiston menetys	o	o	o	o
Paloriskit	o	o	o	o
Korkea merivesi	o	_	o	o
Jäähdytysvesikanavan menetys	o	o	o	o

o = ohje kunnossa
_ = ohjetta ei laadittu, ei tarvetta laatia
x = ohjeessa havaittu puutteita / parannusehdotuksia
p= ohje puuttuu, tulisi laatia

8 YHTEENVETO

Työssä tarkasteltiin voimayhtiöiden seisokkitilojen aikaisten häiriö- ja hätätilanteiden varalta laatimien ohjeiden kattavuutta. Tarkastelun perustella todettiin häiriö- ja hätätilanneohjeiden olevan molemmissa tarkastelluissa ydinvoimalaitoksissa pääosaltaan asianmukaisia ja kattavan hyvin erilaiset seisokin aikana mahdollisina pidetyt alkutapahtumat. Muutamia parannusta vaativia kohtia ohjeistossa kuitenkin havaittiin.

Olkiluodon ohjeistossa merkittävin havainto liittyi tilanteeseen, jossa 321-järjestelmän jälkilämmön poisto menetetään reaktoripainesäiliön kannen ollessa kiinni. Tällaisesta tilanteesta ei ollut laadittu lainkaan ohjetta. Toinen havainto liittyi Olkiluodon tulipaloista laadittuihin ohjeisiin, joiden tulisi suureen tulipaloriskiin vedoten olla nykyistä kattavammat. Näiden lisäksi havaittiin, että reaktorin kriittisyysonnettomuudelle ei ollut laadittu ohjetta, vaikka tilanteen synnyttämän poikkeuksellisen säteilytilanteen vuoksi sen laatiminen olisi perusteltavissa.

Loviisan ohjeistossa merkittävin havainto oli booripitoisuuden laimenemista käsittelevän ohjeen puuttuminen. Lisäksi osaa primääripiirin vuodoista oli käsitelty ainoastaan tehoajolle laadituissa ohjeissa. Myös vuoto- ja raskaan taakan putoaminen -alkutapahtumien välillä oli epäselvyyksiä siitä, kumpaan alkutapahtumaluokkaan laaditut ohjeet oli yhdistetty.

Ohjeiden kattavuuden tarkastelussa käytettiin apuna seisokkitiloja käsitteleviä PRA- ja FSAR-analyyseja sekä TTKE-ehtoja, mitkä tarkastelun perusteella todettiin kattaviksi ja vaatimukset täyttäviksi.

Ohjeiden kattavuuden arvioinnin lisäksi työssä perehdyttiin Loviisan ja Olkiluodon laitosten vuosihuoltoihin yleisesti. Vuosihuoltojen aikaisia riskejä tarkasteltiin laitoskohtaisesti PRA:n avulla. Olkiluodon kiehutusvesireaktoreilla merkittävimmät riskit liittyivät jäähdytteen vuotoihin, tulipaloihin ja jälkilämmön poiston menetyksiin.

Loviisan painevesireaktoreilla puolestaan merkittävimmät riskit olivat raskaiden taakkojen pudotukset, boorin laimeneminen ja öljyonnettomuudet.

Erot riskeissä laitosten välillä johtuvat suurelta osin laitosten teknisistä eroavaisuuksista. Loviisan korkea sydänvaurioriski taakan putoamisista johtuu siitä, että VVER-440 -laitoksissa polttoaineen vaihtoa varten tehtävä reaktorin purku edellyttää runsaasti raskaita reaktorihallin sisäisiä nostoja. Boorin laimenemisesta aiheutuva riski puolestaan johtuu boorihapon käyttämisestä painevesireaktoreiden reaktiivisuuden hallintaan. Loviisan Olkiluotoa korkeampi öljyriski perustuu puolestaan Suomenlahdella kulkevien öljykuljetusten suureen määrään.

Eroa laitosten välillä on myös vertailtaessa vuosihuoltojen aikaisen sydänvaurioriskin osuutta suhteessa kokonaisriskiin. Loviisan laitosten riskistä huomattavasti suurempi osuus, noin 61 %, kohdistuu vuosihuoltoihin verrattuna Olkiluodon laitoksiin, jossa vastaava osuus on noin 25 %.

9 LÄHDELUETTELO

[1] Fortum. 1998. LO1/LO2 Yleiskuvaus osa 2, YP. [Ei julkinen]

[2] Fortum. 1999. LO1/LO2 Yleiskuvaus osa 2, YC. [Ei julkinen]

[3] Fortum. 1999. LO1/LO2 Yleiskuvaus osa 2, YS. [Ei julkinen]

[4] Fortum. 2002. LO1/LO2 Yleiskuvaus osa 2, SA. [Ei julkinen]

[5] Fortum. 2003. LO1/LO2 Yleiskuvaus osa 2, YM. [Ei julkinen]

[6] Fortum. 2007. Loviisa 1. Turvallisuustekniset käyttöehdot 3.2.2 Latausseisokki. [Ei julkinen]

[7] Fortum. 2007. Loviisa 1. Turvallisuustekniset käyttöehdot 3.2.3 Kylmä seisokki. [Ei julkinen]

[8] Fortum. 2007. Loviisa 1. Turvallisuustekniset käyttöehdot 3.2.4 Kuuma seisokki. [Ei julkinen]

[9] Fortum. 2007. Loviisa 1. Turvallisuustekniset käyttöehdot 3.6 Palontorjunta. [Ei julkinen]

[10] Fortum. 2011. Loviisa 1 riskitutkimus. Pääraportin luku 2: Alkutapahtumat. [Ei julkinen]

[11] Fortum. 2011. Loviisa 1 riskitutkimus. Pääraportin luku 3: Onnistumiskriteerit. [Ei julkinen]

[12] Fortum. 2011. Loviisa 1 riskitutkimus: Pääraportin luku 14: Johtopäätökset. [Ei julkinen]

[13] Fortum. 2012. Fortumin suurimmat osakkeenomistajat 30. 11. 2012. [verkkojulkaisu]. [viitattu 11. 12. 2012]. Saatavissa:

http://ir3.quartalflife.com/data/fortum/shareholders/shareholders.php?lang=fi_FI&search_date=2012-11-30.

[14] Fortum. 2012. Kysymyksiä ja vastauksia ydinturvallisuudesta. [verkkojulkaisu]. [viitattu 11. 12. 2012]. Saatavissa: http://www.fortum.com/fi/media/Pages/Kysymyksiajavastauksiaydinturvallisuudesta.aspx.

[15] Fortum. 2012. Loviisan voimalaitos – Historia. [verkkojulkaisu]. [viitattu 11. 12. 2012]. Saatavissa: http://www.fortum.com/fi/energiantuotanto/ydinvoima/loviisan_voimalaitos/historia/sivut/default.aspx

[16] Fortum. 2012. Loviisan ykkösyksikön vuodelle 2014 suunniteltu pitkä vuosihuolto siirtyy vuodelle 2015. Tiedote. [Ei julkinen]

[17] Fortum. 2012. Lovisan voimalaitos - Vuosihuollot. [verkkojulkaisu]. [viitattu 13. 12. 2012]. Saatavissa: http://www.fortum.com/fi/energiantuotanto/ydinvoima/loviisan_voimalaitos/vl-toiminta/vuosihuollot/pages/default.aspx.

[18] Fortum. 2012. Vuosihuoltolehti 2012.

[19] Hiltunen, V. 2010. OL1/OL2 FSAR: 112 Jäähdytysvesikanavat. Teollisuuden voima. [Ei julkinen]

[20] Holmberg, J.-E. 2006. OL1/OL2 PSA osa 14 – Seisokkianalyysi. Teollisuuden Voima. [Ei julkinen]

[21] Hukari, O. 2012. Loviisa 1 häriönselvitysohje: Laitoksen täydellinen ulkoisen sähkönsyötön menetys. Fortum. [Ei julkinen]

[22] Hyrsky, T. 2005. LO1/LO2 FSAR 10.4.10: Jälkilämmönpoistojärjestelmä RR. Fortum. [Ei julkinen]

[23] IAEA. 2000. IAEA-TECDOC-1144 Probabilistic safety assessments. [verkkojulkaisu]. [viitattu 3. 12. 2012]. Saatavissa: www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1144_prn.pdf.

[24] IAEA. 2002. IAEA-TECDOC-1315 Nuclear power plant outage optimization strategy. [verkkojulkaisu]. [viitattu 3. 12. 2012]. Saatavissa: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS449_web.pdf.

[25] IAEA. 2006. Management strategies for nuclear power plant outages. [verkkojulkaisu]. [viitattu 3. 12. 2012]. Saatavissa: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS449_web.pdf.

[26] IAEA. 2012. IAEA Safety Standards. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 10. 12. 2012]. Saatavissa: http://www-ns.iaea.org/standards/.

[27] IAEA. 2012. Member States of the IAEA. [verkkojulkaisu]. [viitattu 10. 12. 2012]. Saatavissa: http://www.iaea.org/About/Policy/MemberStates/.

[28] IAEA. 2012. The IAEA Mission Statement. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 10. 12. 2012]. Saatavissa: http://www.iaea.org/About/mission.html.

[29] Inkiläinen, J. 2009. Loviisa 1 häiriönselvitysohje: Polttoainealtaiden jäähdytysjärjestelmän TG20 ja TG40 samanaikainen vikaantuminen. Fortum. [Ei julkinen]

[30] Kareinen, M. 2012. LO 1 Käyttöohje: 8.1 Tehonalennus ja kriittisyysajo. Fortum. [Ei julkinen]

[31] Kattainen, T. T. M. 2007. Loviisa 1 Häiriönselvitysohje: Alijäähtyminen (suppo), levä, öljy. Fortum. [Ei julkinen]

[32] Kirkinen, A-S. 2009. Loviisa 1 Häriönselvitysohje: Jälkijäähdytyksen menetys

kylmässä seisokissa. Fortum. [Ei julkinen]

[33] Lemmetty, M. 2009. OL1/OL2 FSAR Topical Reports: Eräiden jäähdytysjärjestelmien yhteisvikojen vaikutukset. Teollisuuden Voima. [Ei julkinen]

[34] Lemmetty, M. 2009. OL1/OL2 FSAR Topical Reports: Oletettujen onnettomuuksien laajennuksiin kuuluvat reaktorin paineastian vuodot. Teollisuuden Voima. [Ei julkinen]

[35] Lemmetty, M. 2011. OL1/OL2 FSAR 9.7: Design Extension Accidents. Teollisuuden Voima. [Ei julkinen]

[36] Malinen, A. 2004. OL1/OL2 Häiriöohje: Reaktoripaineastian pohjavuoto polttoaineenvaihtoseisokissa. Teollisuuden Voima. [Ei julkinen]

[37] Malinen, A. 2005. OL1/OL2 Häiriöohje: Onnettomuudet polttoaineen käsittelyn yhteydessä. Teollisuuden Voima. [Ei julkinen]

[38] Malinen, A. 2007. OL1/OL2 Häiriöohje: Jäähdytysvesikanavan sortuma. Teollisuuden Voima. [Ei julkinen]

[39] Malinen, A. 2008. OL1/OL2 Häiriöohje: Järjestelmien 321 ja 324 jäähdytystoiminnan samanaikainen menetys polttoaineenvaihdon aikana. Teollisuuden Voima. [Ei julkinen]

[40] Malinen, A. 2009. OL1/OL2 Häiriöohje: Instrumenttiputken murtuma tietyissä huonetiloissa. Teollisuuden Voima. [Ei julkinen]

[41] Malinen, A. 2011. OL1/OL2 Hätätilanneohje: Sähkön menetys. Teollisuuden Voima. [Ei julkinen]

[42] Malinen, A. 2011. OL1/OL2 Käyttökäsikirja: 321 Sammutetun reaktorin

jäähdytysjärjestelmä.Teollisuuden Voima. [Ei julkinen]

[43] Malinen, A. 2011. OL1/OL2 Käyttökäsikirja: Alasajo tehoajolta kuuman, sammutetun reaktorin kautta ydinlämmitykseen. Teollisuuden Voima. [Ei julkinen]

[44] Malinen, A. 2011. OL1/OL2 Käyttökäsikirja: Alasajo ydinlämmityksestä tai kuumasta, sammutetusta reaktorista kylmään, sammutettuun reaktoriin. Teollisuuden Voima. [Ei julkinen]

[45] Malinen, A. OL1/OL2 Häiriöohje: Järjestelmän 321 toiminnan menetys polttoaineenvaihdon aikana. Teollisuuden Voima. [Ei julkinen]

[46] Mannila, J. 2010. HS.fi Uutiset: Öljykuljetusten riskejä yritetään pienentää Suomenlahdella. [verkkojulkaisu]. [viitattu 13. 12. 2012]. Saatavissa: http://www.hs.fi/kotimaa/artikkeli/%C3%96ljykuljetusten+riskej%C3%A4+yritet%C3%A4%C3%A4n+pienent%C3%A4%C3%A4+Suomenlahdella/1135257284040.

[47] Mustonen, M. 2008. OL1/OL2 Periodic safety review: Control drop accident methodology. Westinghouse. [Ei julkinen]

[48] Nuclear Energy Institute. 1997. Soviet-Designed Nuclear Power Plants in Russia, Ukraine, Lithuania, Armenia, the Czech Republic, the Slovak Republic, Hungary and Bulgaria. [verkkojulkaisu]. [viitattu 11. 12. 2012]. Saatavissa: http://www.nei.org/filefolder/soviet_plant_source_book.pdf.

[49] Olkiluoto 1 & 2. 2012. [verkkojulkaisu]. [viitattu 11. 12. 2012]. Saatavissa: http://fi.wikipedia.org/wiki/Tiedosto:Olkiluoto_1%262.jpg

[50] Palsinajärvi, C. 2006. FSAR 14.11: Kylmäseisokista lähtevät transientit. Fortum. [Ei julkinen]

[51] Palsinajärvi, C. 2006. FSAR 14.12: Latausseisokista lähtevät tansientit. Fortum. [Ei julkinen]

[52] Palsinajärvi, C. 2006. LO1/LO2 FSAR 14.10: Kuumaseisokista lähtevät transientit. [Ei julkinen]

[53] Pesonen, J. 2011. OL1/OL2 PSA osa 2 – Päätuloksien yhteenveto. Teollisuuden Voima. [Ei julkinen]

[54] Purho, T. 2006. Diplomityö: Todennäköisyyspohjaisen paloanalyysimenetelmän kehittäminen ydinvoimalaitoksella. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

[55] Räsänen, S. 2006. LO1 TTKE Liite 1.2.1 Käyttötilojen määritelmät. Fortum. [Ei julkinen]

[56] Räsänen, S. 2012. LO 1 Käyttöohje: Laitoksen ylösajo kylmästä seisokista käynnistysparametreille. Fortum. [Ei julkinen]

[57] Sandberg, J. (toim.). 2004. Kirjasarja: Säteily- ja ydinturvallisuus, osa 5: Ydinturvallisuus. Säteilyturvakeskus. ISBN 951-712-50-3.

[58] Sorjonen, J. 2012. Loviisa 1 hätätilanneohje: Polttoaineen käsittelyonnettomuus tai raskaan esineen putoaminen latausaltaaseen tai reaktoriin. Fortum. [Ei julkinen]

[59] Säteilyturvakeskus. 2012. Ydinvoimalaitosten käyttö / laitostapahtumat – tietokanta. [Ei julkinen]

[60] Säteilyturvakeskus. 2012. YVL A.6 luonnos 4. Ydinvoimalaitosten käyttötoiminta. [verkkojulkaisu]. [viitattu 7. 12. 2012]. Saatavissa: https://ohjeisto.stuk.fi/YVL/A.6-L4.pdf.

[61] Säteilyturvakeskus. 2012. YVL A.7 luonnos 4. Ydinvoimalaitosten riskien hallinta. [verkkojulkaisu]. [viitattu 7. 12. 2012]. Saatavissa:

https://ohjeisto.stuk.fi/YVL/A.7-L4.pdf.

[62] Säteilyturvakeskus. 2012. YVL B.3 luonnos 4. Ydinvoimalaitoksen turvallisuusanalysit. [verkkojulkaisu]. [viitattu 10. 12. 2012]. Saatavissa: https://ohjeisto.stuk.fi/YVL/B.3-L4.pdf.

[63] Säteilyturvakeskus. 2012. YVL-ohjeisto. [verkkojulkaisu]. Saatavissa: http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinvoimalaitokset/saannosto/fi_FI/yvl/. [viitattu 10. 12. 2012].

[64] Säteilyturvakeskus. STUKin loppuraportti stressitesteistä valmistui. 2011. [verkkojulkaisu]. [viitattu 11. 12. 2012]. Saatavissa: http://www.stuk.fi/stuk/tiedotteet/fi_FI/news_707/.

[65] Teollisuuden Voima 2012. OL1/OL2 TTKE 7.12: Sydänmuutokset. [Ei julkinen]

[66] Teollisuuden Voima 2012. OL1/OL2 TTKE 7.15: Palosuojelu. [Ei julkinen]

[67] Teollisuuden Voima 2012. OL1/OL2 TTKE 7.3: Reaktiivisuuden säätö. [Ei julkinen]

[68] Teollisuuden Voima 2012. OL1/OL2 TTKE 7.4: Sydämen jäähdytys. [Ei julkinen]

[69] Teollisuuden Voima 2012. OL1/OL2 TTKE 7.6: Laudutusallas. [Ei julkinen]

[70] Teollisuuden Voima, OL1/OL2 TTKE 7.10: Sähkövoiman syöttö. [Ei julkinen]

[71] Teollisuuden Voima, OL1/OL2 TTKE 7.8: Jälkilämmön poisto. [Ei julkinen]

[72] Teollisuuden Voima. 2007. Ydinvoimalaitosyksiköt Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2. [verkkojulkaisu]. [viitattu 10. 12. 2012]. Saatavissa: [verkkojulkaisu]. [viitattu 10. 12. 2012]. Saatavissa: http://www.tvo.fi/www/page/ol1ol2/.

[73] Teollisuuden Voima. 2010. Olkiluoto 4 periaatepäätöshakemus. [verkkojulkaisu]. [viitattu 10. 12. 2012]. Saatavissa: http://www.olkiluoto4.fi/www/page/ol4_periaatepaatoshakemus/.

[74] Teollisuuden Voima. 2011. Vuosihuolto 2011. Esite.

[75] Teollisuuden Voima. 2012. 880 MW:n kiehutusvesireaktorit OL1 ja OL2. [verkkojulkaisu]. [viitattu 10. 12. 2012]. Saatavissa: http://www.tvo.fi/www/page/ol1ol2/.

[76] Teollisuuden Voima. 2012. OL1/OL2 TTKE 7.14: Raskaat kuljetukset reaktorirakennuksessa. [Ei julkinen]

[77] Teollisuuden Voima. Usein kysytyt kysymykset – Ydinturvallisuus. [verkkojulkaisu]. [viitattu 10. 12. 2012]. Saatavissa: http://www.tvo.fi/www/page/3535/.

[78] Teollisuuden Voima. Vuosihuolto. [verkkojulkaisu]. [viitattu 10. 12. 2012]. Saatavissa: http://www.tvo.fi/www/page/138/.

[79] Tunturivuori, L. 2011. OL1/OL2 PRA osa 12 – Paloanalyysi. Teollisuuden Voima. [Ei julkinen]

[80] World Nuclear. 2012. Nuclear Power in Sweden. [verkkojulkaisu]. [viitattu 7. 12. 2012]. Saatavissa: http://www.world-nuclear.org/info/inf42.html.

[81] Ydinenergialaki. Finlex. [verkkojulkaisu]. [viitattu 7. 12. 2012]. Saatavissa: http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1987/19870990.

[82] Auer, A. 1982. Puoli vuosisataa Imatran voimaa: Imatran voima oy:n synty ja kehitys 1980-luvulle. Imatran Voima. ISBN 951-9100-09-1.