

**Alikriittisyyden varmistaminen
polttoaineenvaihtoseisokissa
painevesilaitoksessa**

Olkiluoto 3

Aki Saarinen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2021
Tekniikan ala
Insinööri (ylempi AMK), energialiiketoiminnan johtaminen

Tekijä(t) Saarinen Aki	Julkaisun laji Opinnäytetyö, ylempi AMK	Päivämäärä Toukokuu 2021
	Sivumäärä 110	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: kyllä
Työn nimi Alikriittisyyden varmistaminen polttoaineenvaihtoseisokissa painevesilaitoksessa Olkiluoto 3		
Tutkinto-ohjelma Energialiiketoiminnan johtaminen		
Työn ohjaaja(t) Hannariina Honkanen, Kari Hytönen		
Toimeksiantaja(t) Teollisuuden Voima Oyj		
Tiivistelmä <p>Alikriittisyyden varmistaminen on tärkeä osa ydinturvallisuutta polttoaineenvaihdossa. Kehittämistyön viitekehys muodostettiin ydinturvallisuuden, alikriittisyyden ja polttoaineenvaihdon ympärille. OL3-ydinvoimalaitoksen polttoainelataus suoritettiin ensimmäistä kertaa. Tutkimuksen tavoitteena oli saada alikriittisyyteen vaikuttavat tekijät yhteen dokumenttiin sekä selvittää niiden vaikutus polttoainelatauksen etenemiseen. Tutkimuksen tuloksilla kehitetään menettelyjä, ohjeistuksia ja työtapoja tulevissa vuosihuolloissa.</p> <p>Kehittämistyö suoritettiin tapaustutkimuksena perehtymällä tapaukseen syvällisesti todellisessa ympäristössä. Tutkimus toteutettiin laadullisena tutkimuksena keräämällä aineistoa dokumenttianalyysin, havainnoinnin ja asiantuntijahaastattelun avulla. Alikriittisyyteen vaikuttavia tekijöitä käsiteltiin fysikaalisten ilmiöiden lisäksi määräaikaikokeiden, työvaiheiden tarkastelun ja automaation näkökulmista. Työvaiheiden seurannan tarkastelu oli jaettu polttoainesiirojen, altaiden pesun ja työluotoiminnan tarkasteluun. Polttoainesiirojen havainnoinnin kautta osallistuttiin myös reaktorisydämen lopputarkastukseen.</p> <p>Alikriittisyyteen vaikuttavat tekijät kerättiin tavoitteen mukaisesti yhdeksi dokumentiksi yrityksen käyttöön. Tuloksissa esitetään myös alikriittisyyteen vaikuttavien tekijöiden vaikutus polttoainesiirojen etenemiseen. Kehittämisehdotuksia löydettiin alikriittisyyden varmistamisen parantamiseksi ohjeistuksien ja menettelyjen kehittämisen lisäksi automaation osalta.</p> <p>Kehittämistyölle asetetut tavoitteet saavutettiin. Kehittämistyön merkittävimmät muutokset ovat toteutettavissa seuraavaan polttoainelataukseen. Kehittämistyössä löydettiin myös mielenkiintoisia ja haasteellisia jatkotutkimusaiheita.</p>		
Avainsanat (asiasanat) ydinturvallisuus, alikriittisyys, painevesilaitos, polttoainelataus		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Saarinen Aki	Type of publication Master's thesis	Date May 2021 Language of publication: Finnish
	Number of pages 110	Permission for web publication: yes
Title of publication Ensuring subcriticality during Refueling Operation in Pressurized Water Reactor Olkiluoto 3		
Degree programme Energy Business Management		
Supervisor(s) Honkanen Hannariina, Hytönen Kari		
Assigned by Teollisuuden Voima Oyj		
Abstract <p>Ensuring subcriticality is an important part of nuclear safety during refueling. The framework for development work was formed around for nuclear safety, subcriticality and refueling. The refueling operation of OL3 nuclear power plant was conducted for the first time. The aim of this study was to bring the factors influencing subcriticality into one document and to clarify their effect on the progress of refueling. The results of the study will be utilized to develop procedures, guidelines and working methods for future refueling.</p> <p>The development work was carried out as a case study by studying the case in depth in the real environment. The study was conducted out as a qualitative study by collecting data through document analysis, observation and specialist interview. In addition to physical phenomena, factors affecting subcriticality were covered from the perspectives of periodic tests, review of work phases and automation. The review of work phase monitoring was divided into reviews of refueling, cleaning of pools and work permit activities. In addition, the final inspection of the reactor core was participated in through observation of refueling.</p> <p>The factors influencing the subcriticality were collected in accordance with the target into one clear-cut document for the use of the enterprise. The results also show the effect of factors affecting subcriticality on the progress of refueling. Proposals for further development were found to improve the ensuring of subcriticality. Besides automation, these development proposals concern the development of guidelines and procedures.</p> <p>The objectives set for the Master's thesis were achieved. The most significant changes in the development work can be implemented for the next refueling. In addition, interesting and challenging further research topics were found during development work.</p>		
Keywords/tags (subjects) nuclear safety, subcriticality, pressurized water reactor, refueling		
Miscellaneous (Confidential information)		

Sisältö

1	Johdanto	6
2	Toimintaympäristö	7
2.1	Teollisuuden Voima Oyj	7
2.2	Olkiluoto 3	9
3	Kehittämistyön lähestymistapa ja tutkimusmenetelmät	12
3.1	Tutkimuskysymykset.....	12
3.2	Lähestymistapa	12
3.3	Tutkimusmenetelmät.....	14
3.3.1	Dokumenttianalyysi.....	14
3.3.2	Havainnointi	16
3.3.3	Haastattelu.....	18
4	Ydinturvallisuus	20
4.1	Syvyysuuntainen turvallisuusajattelu.....	20
4.2	Jälkilämpöteho.....	22
4.3	Turvallisuustekniset käyttöehdot	23
4.4	Turvallisuusjärjestelmien suunnitteluperusteet	25
5	Painevesilaitos	27
5.1	Toimintaperiaate	27
5.2	Käyttötilat.....	29
5.3	Määräaikauskokeet.....	30
5.4	Käyttömääräin	31
5.5	Työlupakäytäntö	32
5.6	Polttoaineenvaihto	33
5.6.1	Organisaatio	33
5.6.2	Polttoainelatauksen periaate.....	35
5.7	Automaatio.....	38
6	Alikriittisyyteen vaikuttavat fysikaaliset tekijät	40
6.1	Polttoaineen lämpötila.....	41

		2
6.2	Jäähdytteen lämpötila.....	41
6.3	Boorikonsentraatio	41
6.4	Reaktorimyrkyt	42
6.5	Palama.....	43
6.6	Säätösauvat	43
7	Alikriittisyyden valvonta.....	43
7.1	Prosessin valvonta	44
7.1.1	Käyttöliittymät.....	44
7.1.2	Järjestelmät.....	45
7.1.3	Alikriittisyyden heikkenemisestä aiheutuvat rajoitukset ja seuraukset	49
7.2	Instrumentointi.....	50
7.2.1	Boorikonsentraatio.....	51
7.2.2	Neutronivuomittaus	52
7.3	Ohjeistus.....	56
7.3.1	Normaali käyttö.....	56
7.3.2	Häiriötilanne.....	57
7.3.3	Hätätilanne.....	57
7.3.4	HU-työkalut	58
8	Kehittämistyön toteutus.....	60
8.1	Kehittämistyön toteutusmenetelmät	60
8.2	Alikriittisyyteen vaikuttavien fysikaalisten tekijöiden tarkastelu.....	63
8.2.1	Polttoaineen lämpötila	63
8.2.2	Jäähdytteen lämpötila	64
8.2.3	Boorikonsentraatio.....	66
8.2.4	Reaktorimyrkyt.....	68
8.2.5	Palama	69
8.2.6	Säätösauvat.....	70
8.2.7	Yhteenveto.....	71
8.3	Määräaikaiskokeiden vaikutusten tarkastelu.....	73
8.4	Työvaiheiden vaikutusten tarkastelu.....	75
8.4.1	Polttoainesirrot	75

	3
8.4.2	80
8.4.3	82
8.5	84
9 Tulokset	87
9.1	87
9.2	92
9.3	93
9.4	97
9.5	97
9.6	99
10 Pohdinta	101
Lähteet	104
Liitteet	107
Liite 1. Teemahaastattelurunko	107
Liite 2. Siirtolista	108
Liite 3. Sydän kartta	109
Liite 4. Täyssuolanpoistetun veden käyttölomake	110
Kuviot	
Kuvio 1. Osakejakauma prosentteina 30.7.2020	8
Kuvio 2. OL3 leikkauskuva ja rakennuskokonaisuudet	10
Kuvio 3. Polttoaineen siirtolaitteistot reaktori- ja polttoainerakennuksessa	11
Kuvio 4. Jälkilämpöteho	23
Kuvio 5. Turvallisuusjärjestelmien suunnitteluperiaatteet	27
Kuvio 6. Painevesireaktorin toimintaperiaate	28
Kuvio 7. Latausjärjestys	36
Kuvio 8. Yleiskuva polttoainesiirtolaitteista	37
Kuvio 9. Automaatioarkkitehtuuri ja turvallisuusajattelun mukaiset toiminnalliset tasot	39

	4
Kuvio 10. Ulkopuolisten neutronivuoantureiden mittausalueet	54
Kuvio 11. Antureiden sijainti	55
Kuvio 12. Alikriittisyyteen vaikuttavat fysikaaliset tekijät	87

Taulukot

Taulukko 1. OL3 käyttötilat	30
Taulukko 2. Neutronivuomittauksen anturityypit ja mittausalueet.....	53
Taulukko 3. Alikriittisyyteen vaikuttavat fysikaaliset tekijät ja vaikutus polttoaineenvaihdon keskeytymiseen.....	92
Taulukko 4. Alikriittisyyteen vaikuttavat tekijät ja vaikutus polttoaineenvaihdon keskeytymiseen.	99

Lyhenteet

CCU	Polttoainesiirtojen valvontalaitteisto
DTC	Doppler Temperature Coefficient (Doppler lämpötilakerroin)
EPR	European Pressurized Water Reactor
EURATOM	Euroopan atomienergiayhteisö
FTF	Fuel Transfer Facilities (Siirtolaitteisto)
GHC	Täyssuolanpoistetun veden jakelujärjestelmä
IAEA	Kansainvälinen atomienergiajärjestö
IRD	Intermediate Range Detector (Välialueen neutronivuodetektori)
JDH	Hätäboorausjärjestelmä
JKT	Reaktorin ulkopuolinen sydäninstrumentointi
KBA	Tilavuudensäätöjärjestelmä
KBC	Boori- ja lisävesijärjestelmä
KBE	Jäähdytteen puhdistusjärjestelmä
KUA	Aktiivisten nesteiden näytteenottojärjestelmä
MTC	Moderator Temperature Coefficient (Hidastimen lämpötilakerroin)
PICS	Prosessin informaatio- ja ohjausjärjestelmä
ppm	Parts per million
PRD	Power Range Detector (Tehoalueen neutronivuodetektori)
PS	Protection System (Suojausjärjestelmä)
RCSL	Reactor Control Surveillance and Limitation (Reaktorin säätö-, valvonta- ja rajoitusjärjestelmä)
RM	Refueling Machine (Latauskone)
SFMB	Spent Fuel Mast Bridge (Polttoainerakennuksen polttoaineensiirtokone)
SICS	Turvallisuuskäyttöliittymäjärjestelmä
SNDS	Supplementary Neutron Detector System
SRD	Source Range Detector (Lähdealueen neutronivuodetektori)
STUK	Säteilyturvakeskus
TTKE	Turvallisuustekniset käyttöehdot

1 Johdanto

Ydinvoimalla tuotetaan Suomen sähkön tarpeesta noin 34 % vuonna 2020 (Sähkön-
tuotanto 2021). Suomessa on toiminnassa neljä ydinvoimalaitosta, joista kaksi kiehu-
tusvesilaitosta sijaitsee Eurajoella ja kaksi painevesilaitosta Loviisassa. Suomen vii-
dennen ydinvoimalaitoksen ensimmäinen polttoainelataus toteutettiin tätä kehittä-
mistyötä tehdessä. Olkiluoto 3 (OL3) on teholtaan maailman suurin ydinvoimalaitos.
Suomen kuudetta ydinvoimalaitosta rakennetaan Pyhäjoelle.

Ydinturvallisuus ja siihen keskeisesti liittyvä reaktiivisuuden hallinta on tärkeä asia
ydinvoiman käytössä. Tämän kehittämistyön tavoitteena oli saada selville alikriittisyy-
teen vaikuttavat tekijät ja niiden merkityksellisyys Olkiluoto 3 -ydinvoimalaitoksen
polttoaineenvaihtoseisokissa. Tutkimuskysymyksillä haluttiin selvittää operationaali-
set riskilähteet alikriittisyyden suhteen todellisessa ympäristössä, joiden avulla pysty-
tään kehittämään menettelyjä, ohjeistuksia ja työtapoja. Työn yhtenä tavoitteena oli
saada kerättyä alikriittisyyteen vaikuttavat tekijät yhteen dokumenttiin. Polttoai-
neenvaihtoseisokilla tarkoitetaan ydinvoimalaitoksessa määrävälein suoritettavaa
vuosihuoltoa, jossa osa käytetyistä polttoainenipuista vaihdetaan tuoreisiin. Vuosi-
huollossa vaihdettavien tuoreiden polttoainenippujen määrä riippuu valitusta poltto-
aineenhallinta suunnitelmasta, johon vaikuttavat latausjärjestys ja käyttöjakson pi-
tuus. (Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3 2014, 17.)

Reaktorin kriittisyyttä kuvataan kasvutekijällä k , joka on uuden sukupolven neutro-
nien lukumäärän suhde aikaisemman sukupolven neutronien määrään. (Kouhia &
Kyrki-Rajamäki 2014, 45.) Alikriittisyys tarkoittaa tilaa, jossa ei tapahdu fissioissa va-
pautuvien neutronien ylläpitämää ketjureaktiota (Määritelmät 2021). Reaktori on ali-
kriittinen sellaisessa tilanteessa, jossa neutronien lukumäärä peräkkäisissä sukupol-
vissa on laskeva. Tällöin neutronien ja fissioiden lukumäärä vähenee neutronisuku-
polvesta toiseen kohti nollaa. (Kouhia & Kyrki-Rajamäki 2014, 45.)

Kehittämistyön yhtenä tavoitteena oli saada selville myös alikriittisyyteen vaikutta-
vien tekijöiden merkityksellisyys. Merkityksellisyydellä tarkoitetaan tekijöitä, jotka

voivat aiheuttaa tilapäisen keskeytyksen polttoaineenvaihdolle. Kehittämistyön tavoitteena oli myös tuoda esille alikriittisyyden varmistamisen parantamiseen liittyvät mahdolliset kehittämisenäkökulmat. OL3-ydinvoimalaitoksen polttoaineenlataus suoritetaan ensimmäistä kertaa, mikä lisää aiheen merkityksellisyyttä valtakunnallisesti ja jopa kansainvälisesti. Britanniassa ja Ranskassa otetaan käyttöön lähitulevaisuudessa vastaavia laitoksia kuin OL3-ydinvoimalaitos, minkä vuoksi kehittämistyön kansainvälinen merkitys korostuu.

Alikriittisyys terminä voidaan yhdistää yleisesti kaikkiin fissioreaktoreihin. OL3-ydinvoimalaitos on tekniikaltaan kolmannen sukupolven painevesilaitos, minkä vuoksi aikaisempia tutkimuksia edellisten sukupolvien ydinvoimalaitoksista ei voida hyödyntää tässä tutkimuksessa. Työstä rajattiin pois vakavat polttoaineenvaihto-onnettomuudet, koska niistä on olemassa tutkimukseen perustuvia turvallisuusanalyysijä. Polttoaineenvaihdon tilapäisellä keskeytymisellä on taloudellisia vaikutuksia, mutta kehittämistyössä ei ole tarkoitus tutkia polttoaineenvaihdon viivästymisen aiheuttamia taloudellisia vaikutuksia.

2 Toimintaympäristö

2.1 Teollisuuden Voima Oyj

Teollisuuden Voima Oyj (TVO) on listaamaton julkinen osakeyhtiö. Yrityksen suurin omistaja on Pohjolan Voima Oyj. Konserniin kuuluvat myös tytäryhtiö TVO Nuclear Services Oy ja ydinjätehuolto-yhtiö Posiva Oy. Posiva Oy on TVO:n ja Fortumin omistama yhteisyritys, joka vastaa käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksesta. Lisäksi TVO:n omistajayhtiöitä ovat EPV Energia Oy, Fortum Power and Heat Oy, Loiste Holding Oy, Kemira Oyj ja Oy Mankala Ab. (TVO-konserni N.d.)

Yhtiössä on kaksi osakesarjaa. Kuviossa 1 on esitetty osakejakauma prosentteina. A-sarja antaa oikeuden OL1- ja OL2-ydinvoimalaitosyksiköiden tuottamaan sähköön. B-

sarja oikeuttaa OL3-ydinvoimalaitosyksikön tuottamaan sähkään. (TVO-konserni N.d.)

	A-sarja (OL1 ja OL2)	B-sarja (OL3)	Yhteensä
EPV Energia Oy	6,6	6,6	6,6
Fortum Power and Heat Oy	26,6	25,0	25,8
Loiste Holding Oy	0,1	0,1	0,1
Kemira Oyj	1,9	-	0,9
Oy Mankala Ab	8,1	8,1	8,1
Pohjolan Voima Oyj	56,8	60,2	58,5
	100	100	100

Kuvio 1. Osakejakauma prosentteina 30.7.2020. (TVO-konserni.)

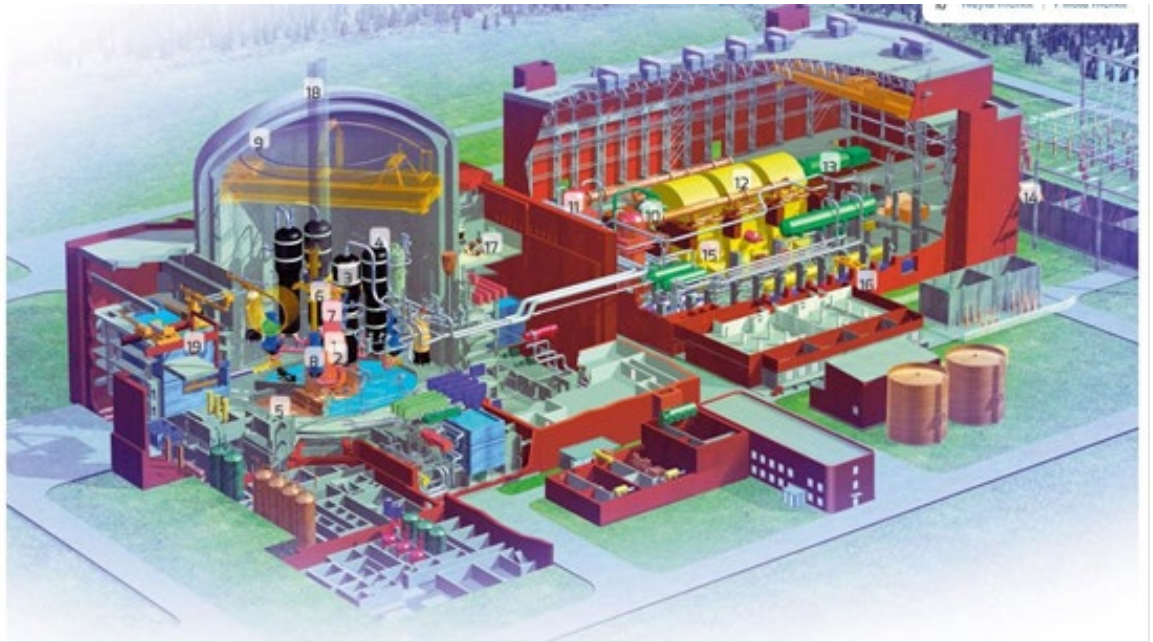
OL1- ja OL2-laitosyksiköiden nettoteho on n. 880 MW. OL3:n nettoteho on 1600 MW. TVO:n ydinsähköä tuotetaan suorien omistajien kautta 132:een kuntaan. Nämä kunnat omistavat energiayhtiöitä, joiden kautta Olkiluodossa tuotettua sähkää jaetaan koko Suomeen. (TVO-konserni N.d.)

Teollisuuden Voima Oyj:ssä työskentelee yhteensä noin 940 ihmistä. TVO-konsernin liikevaihto vuonna 2019 oli noin 254 miljoonaa euroa. (Tammi-syyskuu osavuositiedot 2020, 9.) TVO tuottaa sähkää omistajilleen omakustannushintaan. Omistajat vastaavat TVO:lle aiheutuvista kustannuksista ja saavat vastineeksi sähkää omistusosuksiensa suhteessa. TVO:lle ja omistajille merkittäviä tunnuslukuja ovat tuotetun sähkön määrä ja käyttökertoimet, joilla laitosyksiköt ovat toimineet. OL1- ja OL2-laitosyksiköiden yhteenlaskettu sähköntuotanto vuonna 2019 oli 14,75 TWh ja yhteinen käyttökerroin oli 94,8 %. (Talous ja rahoitus N.d.)

2.2 Olkiluoto 3

OL3-voimalaitosyksikön tyyppinimi on EPR, joka tulee englanninkielisistä sanoista European Pressurized Water Reactor. Laitosyksikön kokonaistoimituksesta vastaa Areva-Siemens-konsortio. Areva vastaa reaktorilaitoksen ja Siemens turbiinilaitoksen toimituksesta. OL3 on edistyksellinen verrattuna nykyisiin käytössä oleviin laitoksiin, mutta perusratkaisut perustuvat käytössä olevien laitosten koeteltuun tekniikkaan ja hyviin käyttökokemuksiin. Turvallisuusominaisuuksia on kehitetty lisää huomioiden esimerkiksi vakavien reaktorionnettomuuksien hallinta. Turvallisuuden lisäksi suunnittelussa on kiinnitetty huomiota taloudellisuuteen, jonka vuoksi laitoksen hyötysuhde on noin 37 %. Laitoksen suunnittelun lähtökohtana on myös vähintään 60 vuoden käyttöikä. (Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3 2014, 4-5.)

OL3-laitoksen rakennukset voidaan jakaa reaktori- ja turbiinilaitokseen sekä apu- ja tukirakennuksiin. Kuvioista 2 nähdään, että reaktorilaitokseen kuuluvat reaktorin suojarakennuksen lisäksi sen ympärillä olevat turvallisuusrakennukset sekä polttoainerakennus. Polttoainerakennuksen vieressä ovat reaktorin apurakennus ja jätteenkäsittelyrakennus. Turbiinirakennuksen pohjoispuolella sijaitsevat pää- ja omakäyttömuuntajat. Turbiinirakennuksen molemmilla sivuilla ovat merivesipumppaamo ja kytkinlaitos. Apu- ja tukirakennuksiin kuuluu myös sisäänkulkurakennus, joka on kahden turvallisuusjärjestelmärakennuksen kyljessä. Lisäksi laitosalueella sijaitsevat erilliset dieselrakennukset ja merivesijärjestelmiin kuuluvat rakennukset mukaan lukien maanalaiset tilat. Näiden lisäksi on useita muita pienempiä tukijärjestelmärakennuksia. (Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3 2014, 9-11.)

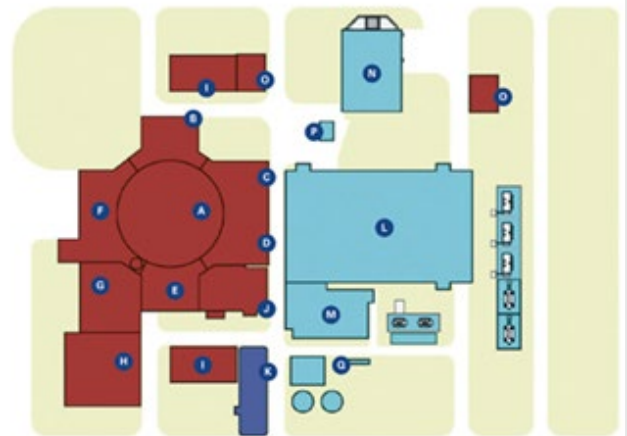


OL3 leikkauskuva ja rakennuskokonaisuus

- A Reaktorirakennus
- B Turvallisuusjärjestelmärakennus 1
- C Turvallisuusjärjestelmärakennus 2
- D Turvallisuusjärjestelmärakennus 3
- E Turvallisuusjärjestelmärakennus 4
- F Polttoainerakennus
- G Reaktorirakennuksen apurakennus
- H Jätteenkäsittelyrakennus
- I Dieselrakennus
- J Sisäänkulkurakennus
- K Toimistorakennus
- L Turbiinirakennus
- M Kytkinlaitos
- N Merivesipumppaamo
- O Varmennetun merivesijärjestelmän pumppaamo
- P Suponestojärjestelmän pumput
- Q Apuhöyrykattilarakennus

OLKILUOTO 3:N RAKENNUSKOKONAIUUDET

- AREVA NP (reaktorilaitos)
- Siemens PG (turbiinilaitos)
- TVO (toimistorakennus)

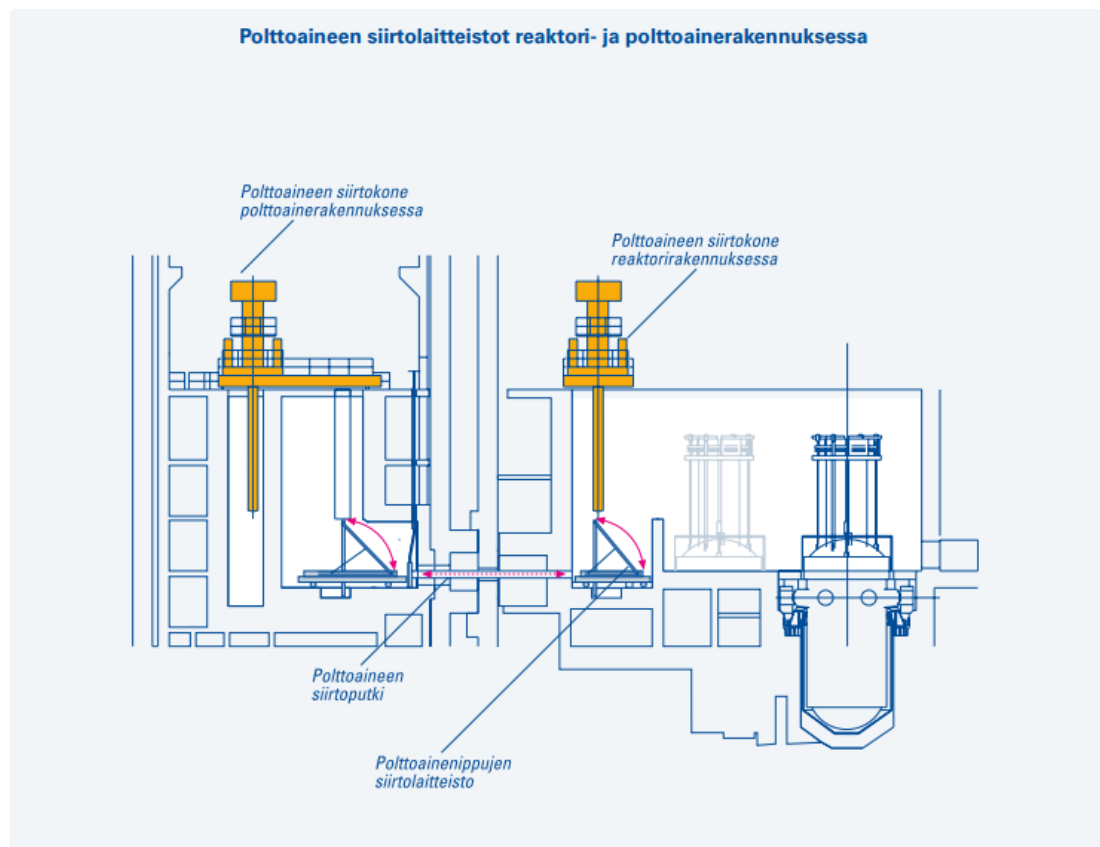


Kuvio 2. OL3 leikkauskuva ja rakennuskokonaisuudet. (Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3 2014.)

Polttoaineniput kuljetetaan suojarakennuksen ja polttoainerakennuksen välillä siirto-putken kautta. Polttoainenippujen siirtoa varten polttoainerakennuksessa on polttoaineensiirtokone. Vastaava polttoaineensiirtokone on reaktorirakennuksessa, josta

käytetään yleisesti termiä latauskone. Polttoainerakennuksessa ovat tuoreen ja käytetyn polttoaineen säilytysaltaat, joissa säilytetään tuoreen polttoaineen lisäksi reaktorista poistettuja polttoainenippuja jäähtymässä ennen siirtoa käytetyn polttoaineen välivarastoon. (Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3 2014, 20.)

Kuviosta 3 nähdään kummankin rakennuksen polttoaineen siirtokoneet sekä rakennukset yhdistävä polttoaineensiirtoputki siirtolaitteistoineen. Polttoaineen purussa polttoainenippu nostetaan siirtokoneella reaktorisydäimestä pois ja kuljetetaan siirtolaitteistolle. Siirtolaitteistossa polttoainenippu käännetään vaakasuoraan asentoon ja kuljetetaan siirtoputken kautta reaktorirakennuksesta polttoainerakennukseen. Polttoainerakennuksessa polttoainenippu käännetään pystyasentoon ja kuljetetaan polttoaineensiirtokoneella polttoaineen varastointitelineeseen. Polttoainelataus tehdään vastaavasti kuin purku, mutta päinvastaisessa järjestyksessä. (Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3 2014, 21.)



Kuvio 3. Polttoaineen siirtolaitteistot reaktori- ja polttoainerakennuksessa. (Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3 2014.)

Reaktorirakennus, polttoainerakennus ja turvallisuusrakennukset on sijoitettu yhteiselle pohjalaatalle ulkoisten häiriövaikutusten, kuten maanjäristyksen ja räjähdysten, aiheuttamien paineaaltojen vuoksi. Reaktorirakennus, polttoainerakennus ja turvallisuusjärjestelmärakennuksista kaksi on suunniteltu kestämään suuren lentokoneen törmäys. (Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3 2014, 9.) Tästä kehittämistyöstä rajattiin pois vakavat polttoaineenvaihto-onnettomuudet.

3 Kehittämistyön lähestymistapa ja tutkimusmenetelmät

3.1 Tutkimuskysymykset

Tutkimuskysymykset tulee määritellä ennen varsinaista tiedonkeruuta. Ongelman ratkaiseminen on usein helpompaa kuin tutkimusongelman asettaminen. Tutkimuskysymykset nousevat kehittämistyön tavoitteista. (Hirsjärvi, Remes & Sajavaara 2007, 121-122.)

Kehittämistyön pää tutkimuskysymys on seuraava:

- Mitkä ovat alikriittisyyteen vaikuttavat tekijät OL3 polttoaineenvaihtoseisokissa?

Kehittämistyön apu tutkimuskysymykset ovat seuraavia:

- Minkälainen on alikriittisyyteen vaikuttavien tekijöiden merkittävyys polttoaineenvaihtoseisokissa?
- Mitkä ovat alikriittisyyteen vaikuttavien tekijöiden vaikutukset polttoaineenvaihdon etenemiseen?

3.2 Lähestymistapa

Tapaustutkimus tuottaa syvällistä ja yksityiskohtaista tietoa tutkittavasta tapauksesta sen todellisessa tilanteessa ja toimintaympäristössä. Tapaustutkimuksen avulla on mahdollista ymmärtää kehittämisen kohdetta kokonaisvaltaisesti realistisessa toimintaympäristössä. Tapaustutkimuksessa tutkimuksen kohteita on vähän, usein vain

yksi. Tutkimuksen kohde valitaan kehittämistyössä työelämän käytännön tarpeen ja kehittämistyölle asetettujen tavoitteiden määrittelemänä. (Ojasalo, Moilanen & Ritalahti 2014, 52-53.)

Tässä kehittämistyössä tapaustutkimuksen kohde on alikriittisyyden varmistaminen polttoaineenvaihtoseisokissa OL3:lla. Alikriittisyyteen vaikuttavia tekijöitä on useita, mutta alikriittisyys on kuitenkin yksi kokonaisuus. Kokonaisuuden laaja-alainen ymmärtäminen vaatii syvällistä perehtyneisyyttä tutkittavaan asiaan, jonka vuoksi tapaustutkimuksessa käytetään usein useita erilaisia tutkimusmenetelmiä. Tässä työssä käytetään haastattelua ja havainnointia tukemaan dokumenttianalyysin kautta saattua tietoa. (Ojasalo ym. 2014, 55.)

Tapaustutkimuksessa lähdetään yleensä liikkeelle analysoitavasta tai tutkittavasta tapauksesta, ei pelkästään yleisistä teorioista. Tämän jälkeen ilmiöön perehdytään käytännössä ja teoriassa. Aineiston keruuseen ja analysointiin käytetään eri menetelmiä. Lopulta kehittämistyössä saadaan ratkaisut tutkimusongelmiin ja mahdolliset kehittämisohjeet. (Ojasalo ym. 2014, 54.)

Tässä kehittämistyössä analysoidaan laajasti OL3-laitokseen liittyvää dokumentaatiota. Alikriittisyyteen vaikuttavia tekijöitä on useita polttoaineenvaihdon aikana ja tekijöillä on synteesejä myös muihin järjestelmiin. Tämän vuoksi dokumenttianalyysin huolellinen toteuttaminen on tärkeää, jotta saadaan syvälinen ymmärrys tutkittavaan asiaan. Asiantuntijahaastattelulla saadaan lisäarvoa tutkittavaan aiheeseen, mikä lisää tutkimuksen luotettavuutta ja ehkäisee väärinymmärrysten mahdollisuutta. Havainnoinnilla voidaan huomata kehittämisenäkökulmia alikriittisyyden näkökulmasta tarkastellen.

Kvalitatiivista tutkimusta käytetään silloin, kun jotakin kohdetta halutaan tutkia mahdollisimman kokonaisvaltaisesti ja selvittää ilmiötä syvällisemmin. Kvalitatiivisessa tutkimuksessa tuloksia ei yleistetä, vaan ne kohdistuvat tutkittuun tapaukseen. (Kananen 2017, 33; Hirsjärvi ym. 2007, 157.)

Kehittämistyössä käytetään kvalitatiivista tutkimusta, johon tapaustutkimus usein liitetään. Aineistot kerätään yleensä luonnollisissa tilanteissa havainnoimalla tilanteita ja analysoimalla kirjallisia aineistoja. (Ojasalo ym. 2014, 55.) OL3-ydinvoimalaitoksen polttoaineenlataus suoritetaan ensimmäistä kertaa. Tutkittavasta asiasta halutaan saada syvälinen ja kokonaisvaltainen käsitys.

Hirsjärven ym. (2007) mukaan kvalitatiivisen tutkimuksen tyypillisiä piirteitä ovat laadullisten metodien käyttö aineiston hankinnassa. Tällaisia metodeja ovat esimerkiksi haastattelut, osallistuva havainnointi sekä erilaisten dokumenttien ja tekstien analyysit, joita käytettiin myös tässä kehittämistyössä. Kvalitatiivisen tutkimuksen tyypillisiä piirteitä ovat myös tutkimuksen toteutus joustavasti ja tapauksen ainutlaatuisuus. (Hirsjärvi ym. 2007, 158, 160.) Tässä kehittämistyössä tutkimuksen suunnitelmia jouduttiin muuttamaan olosuhteiden muuttumisen vuoksi ja aineiston tulkinnassa huomioitiin tutkittavan kohteen ainutlaatuisuus.

3.3 Tutkimusmenetelmät

3.3.1 Dokumenttianalyysi

Dokumenttianalyysi on menetelmä, jossa päätelmiä pyritään tekemään kirjalliseen muotoon tarkastelun kohteena olevista dokumenteista analysoimalla dokumentteja järjestelmällisesti. Analyysi tuo informaatioarvoa, jotta voidaan tehdä selkeitä ja luotettavia johtopäätöksiä. (Ojasalo ym. 2014, 136.)

Kehittämistyössä on tärkeää analysoida kattavasti dokumentteja ja tekstejä OL3-laitokseen liittyen. Dokumenttien kautta on tarkoitus saada selkeä käsitys alikriittisyyteen vaikuttavista tekijöistä polttoaineenvaihdon aikana. Dokumenttien järjestelmällinen läpikäynti ja synteisien yhdistäminen järjestelmällisesti tuovat laaja-alaista ymmärrystä polttoaineenvaihdossa vaikuttaviin alikriittisyystekijöihin. Haasteita dokumenttien analysoinnissa lisää dokumenttien englanninkielisyys ja niiden suuri määrä. Tärkeää analysoinnissa on tutkia materiaaleja systemaattisesti ja osata yhdistellä asioita, jotta keskeinen sisältö ei katoa dokumenttianalyysin aikana.

Dokumenttianalyysin kaksi keskeistä analyysitapaa ovat sisällönanalyysi ja sisällön erittely. Tässä työssä keskeisenä elementtinä on sisällönanalyysi, jossa tarkoituksena on ymmärtää tekstin sisältöä ja merkitystä. Kokonaisvaltaisen ymmärryksen tueksi käytetään jossakin määrin myös sisällön erittelyä, jossa etsitään samankaltaisia asioita tekstistä. Tämän tarkoituksena on tuottaa mahdollista lisäarvoa esitetystä asiasta ja lisätä siten luotettavuutta tutkittavasta asiasta. Ojasalon (2014) mukaan tavat eivät sulje toisiaan pois. (Ojasalo ym. 2014, 137.)

Vilkan (2005) mukaan sisällönanalyysiä voidaan tehdä aineistolähtöisenä tai teorialähtöisenä. Aineistolähtöisessä sisällönanalyysissä tutkijan tavoitteena on löytää tutkimusaineistosta jonkinlainen toiminnan logiikka, jonka jälkeen aloitetaan tutkimusaineiston pelkistäminen. Teorialähtöisessä sisällönanalyysissä on alusta alkaen mukana tutkimukseen perustuva teoria ja tavoitteena on uudistaa teoreettista käsitystä tutkittavasta asiasta. (Vilka 2005, 140.)

Kehittämistyössä käytetään aineistolähtöistä sisällönanalyysiä. Tutkimusaineiston keräämisen jälkeen ja toiminnan logiikan löytymisen jälkeen tutkimusaineistosta karsitaan epäolennainen informaatio. Tutkimusaineiston tiivistämisen jälkeen aineisto ryhmitellään uudeksi johdonmukaiseksi kokonaisuudeksi, jonka avulla yritetään ymmärtää tutkittavan asian merkityskokonaisuutta. Haasteena prosessissa on tutkimusongelman kannalta olennaisen informaation katoaminen pelkistämisen prosessin aikana. Kehittämistyössä panostetaan tutkimusaineiston tiivistämiseen, jolloin pystytään ehkäisemään tärkeän informaation katoamista. Tiivistämistä ohjaavat tutkimuskysymykset. (Vilka 2005, 140; Ojasalo ym. 2014, 137.)

Aineiston käsittely perustuu loogiseen päättelyyn ja tulkintaan. Tulkinta on mukana tutkimuksen kaikissa vaiheissa. Havainnoista ja osatuloksista pyritään laatimaan synteesejä, joiden avulla kootaan yhteen keskeiset tulokset ja saadaan perustellut vastaukset asetettuihin kysymyksiin. Näiden synteisien perusteella laaditaan johtopäätökset ja kehittämistyön suositukset. (Ojasalo ym. 2014, 137, 143-144.)

Kehittämistyössä on tarkoitus tulkita asioita kaikissa tutkimuksen vaiheissa ja muodostaa synteesejä osatuloksista. Tarkoituksena on myös testata ajatuksia tutkimuksen aikana alkuperäiseen aineistoon toistuvasti, koska mekaanisen analyysiprosessin aikana on saattanut kadota jotakin oleellista. Tämän lisäksi on tärkeää tehdä johtopäätökset perusteluineen, eikä jättää niiden tekemistä lukijalle. Sisällönanalyysiä on kritisoitu menetelmänä, koska useissa tapauksissa johtopäätökset ovat jääneet tekemättä, vaikka analyysi on kuvattu hyvin. (Ojasalo ym. 2014, 144; Hirsjärvi ym. 2007, 224-225.)

3.3.2 Havainnointi

Havainnointi on tärkeä ja hyödyllinen tutkimuksellisen kehittämistyön menetelmä, jonka tarkoitus on saada välitöntä ja suoraa tietoa ihmisten toiminnoista luonnollisessa ympäristössä. (Ojasalo ym. 2014, 114; Hirsjärvi ym. 2007, 208).

Havainnointi voi olla tarkasti jäsenneltyä, jolloin käytetään termiä systemaattinen havainnointi. Havainnointi voi olla myös vapaata ja luonnolliseen toimintaan mukautunutta havainnointia. Tällöin käytetään termiä osallistuva havainnointi. Havainnoija osallistuu ryhmän toimintaan ja tekee ilmiöstä omia tulkintojaan. (Ojasalo ym. 2014, 42, 105; Hirsjärvi, ym. 2007, 209-212.)

Kehittämistyön tekeminen aloitetaan havainnoimalla polttoaineenvaihdon toimintaympäristöä kohdeorganisaatiossa. Ojasalon ym. (2014) mukaan havainnointia on hyvä tehdä jo siinä vaiheessa, kun lähdetään hankkimaan taustatietoa tutkimuksen kohteesta. Tässä vaiheessa siis havainnoidaan organisaation ympäristöä ja tapahtumia. Tässä vaiheessa havainnointi ei ole erityisen järjestelmällistä, vaan tarkoituksena on ymmärtää tutkimuksen kohdetta kokonaisvaltaisesti. Järjestelmällinen havainnointi aloitetaan polttoainelatauksen aikana. Kokonaisvaltaisen ymmärtämisen tueksi kerätään aiheeseen liittyviä dokumentteja kattavasti ja haastatellaan asiantuntijaa luotettavuuden ja ymmärryksen lisäämiseksi aiheeseen liittyen. (Ojasalo ym. 2014, 29.)

Havainnointi jaetaan havainnoijan osallistumisen mukaan passiiviseksi tai aktiiviseksi. Aktiivinen osallistuja toimii usein itse työyhteisön jäsenenä. Havainnointitapojen rajat eivät ole selvät, vaan siihen vaikuttaa tutkijan suhde tutkimuskohteeseen. (Ojasalo ym. 2014, 116-118; Vilkkä 2007, 42.) Tässä kehittämistyössä aktiivista havainnointia suoritetaan päävalvomossa ja passiivista havainnointia konkreettisen polttoainelatauksen yhteydessä suoja- ja polttoainerakennuksessa.

Kehittämistyössä käytetään strukturoimatonta havainnointia, joka ei ole jäseneltyä, vaan joustavaa ja väljää toimintaa. Ojasalon (2014) mukaan sitä käytetään, kun halutaan mahdollisimman paljon ja monipuolista tietoa asiasta. Teoriaa käytetään tukena, jotta ilmiössä tapahtuvia asioita voi ymmärtää. Havainnoinnin tavoitteet ja vaadittava tarkkuus täytyy määritellä etukäteen. Tässä kehittämistyössä havainnoinnin tarkoituksena on huomata inhimillisten tekijöiden vaikutus alikriittisyyteen latauksen aikana sekä lisätä dokumenttianalysien kautta saadun informaation luotettavuutta. Haasteita havainnoinnin tavoitteille tuo polttoainelatauksen aikataulu, joka ei ole varmistunut työtä tehdessä. (Ojasalo ym. 2014, 116.)

Lowen (2007) mukaan havainnoinnin aikataulut on tärkeä. Se auttaa tutkijaa keskittymään olennaisiin näkökulmiin tilanteessa ja toisaalta sulkemaan pois tutkimuksen kannalta epäolennaisia asioita. (Lowe 2007, 72.) Järjestelmällinen havainnointi aikataulutetaan, kun polttoainelatauksen aikataulu tarkentuu.

Kehittämistyössä havainnoidaan toimintaympäristöä alusta alkaen, koska se helpottaa dokumenttien kokonaisvaltaista ymmärtämistä ja siten dokumenttianalysin tekemistä. Järjestelmällinen havainnointi aloitetaan polttoainelatauksen yhteydessä. Polttoainelatauksen arvioitu kesto on noin viikko. Polttoainelatausta suoritetaan vuorokauden ympäri, minkä vuoksi havainnoinnin lisätukena käytetään päiväkirjamerkin-
töjä. Päiväkirjamerkinnoista selviävät mahdolliset ongelmat polttoaineenvaihdossa. Tavanomaisesta poikkeavissa tilanteissa haastatteluilla varmistetaan poikkeaman mahdolliset vaikutukset alikriittisyyteen. Kvalitatiiviselle tutkimukselle tyypillisesti suunnitelmia saatetaan joutua muuttamaan olosuhteiden mukaisesti, koska polttoainelatauksen aikataulu ei ole vielä tiedossa. (Hirsjärvi ym. 2007, 160.)

Piilohavainnoinnissa tutkijan on mahdollista osallistua tutkimuskohteen toimintaan osana omaa työtään. Työssä havainnoidaan polttoaineenvaihtoa valvomossa osana omaa työtä. Kentällä havainnointia suoritetaan tarkkailemalla polttoaineenvaihtoa ulkopuolisena tarkkailijana mahdollisuuksien mukaan. Vilkan (2007) mukaan osallistuvan havainnoinnin erikoismuoto piilohavainnointi on eettisesti ongelmallinen havainnointimenetelmä. Tässä kehittämistyössä eettiset ongelmat pystytään välttämään, koska toiminta ydinvoimalaitoksella on tarkasti säänneltyä ja toiminta noudattaa joka tapauksessa tarkkaa ohjeistusta. Havainnointimenetelmiä on kritisoitu siitä, että havainnoija saattaa häiritä tilannetta ja jopa muuttaa sitä. (Ojasalo ym. 2014, 114, 117; Hirsjärvi ym. 2007, 208; Vilka 2007, 42, 53-54.) Tässä kehittämistyössä häiriövaikutukset pystytään minimoimaan havainnoitsijan kuullessa yrityksen organisaatioon, jolloin tarkkailua osana polttoaineenvaihtoa pidetään luonnollisena tilanteena. (Ojasalo ym. 2014, 114, 117; Hirsjärvi ym. 2007, 208; Vilka 2007, 42, 53-54.)

Kehittämistyössä havainnointi tukee dokumenttianalyysin kautta saatua informaatiota ja lisää omalta osaltaan tutkimuksen luotettavuutta. Valvomossa havainnointi tapahtuu osallistuvana havainnointina ja kentällä suoritettavien toimenpiteiden osalta ulkopuolisena tarkkailijana.

3.3.3 Haastattelu

Haastattelu on paljon käytetty tiedonkeruumenetelmä sekä tutkimus- että kehittämistyössä. Haastattelulla saadaan nopeasti kerättyä syvällistä tietoa kohteesta. Haastattelulla on myös mahdollista saada kerättyä uusia näkökulmia avaavaa aineistoa, jos kehittämisen kohde on vähän tutkittu. Haastattelujen tehtävänä voi olla asioiden selventäminen tai syventäminen. (Ojasalo ym. 2014, 106.)

Haastatteluja käytetään usein tiedonkeruumenetelmänä tapaustutkimuksessa. Tutkittavan ilmiön asiantuntijat voivat kuvata ja selittää ilmiötä tarkemmin. Asiantuntija voi selvittää myös tilanteeseen johtaneita syitä, joiden totuudenmukaisuutta voi tutkia muilla menetelmillä esimerkiksi havainnoimalla todellisia tilanteita. Haastattelua

voidaan soveltaa monella eri tavalla joustavuutensa takia. Haastattelussa ollaan suorassa kielellisessä vuorovaikutuksessa haastateltavan kanssa. (Hirsjärvi ym. 2007, 199-200; Ojasalo ym. 2014, 55.)

Haastattelua käytetään tukemaan havainnointia tässä kehittämistyössä. Asiantuntija-haastattelu antaa lisätukea havainnoinnille. Suorittavien työntekijöiden kanssa käydyt keskustelut tukevat myös havaintoja. Asiantuntijan haastattelulla on tarkoitus myös selkeyttää ja syventää dokumenttien kautta saatua tietoa. Asiantuntijan haastattelussa käytetään puolistrukturoitua tai syvähaastattelua.

Puolistrukturoidussa haastattelussa, josta käytetään myös nimitystä teemahaastattelu, tutkimusongelmasta poimitaan keskeiset aiheet ja teema-alueet, joita haastattelussa olisi tutkimusongelmaan vastaamiseksi käsiteltävä. Kysymykset on laadittu ennakkoon, mutta niiden järjestystä voi vaihdella haastattelun aikana. Haastattelu-muodossa voidaan jättää soveltumattomat kysymykset esittämättä ja toisaalta esittää uusia haastattelun aikana mieleen tulevia kysymyksiä. Teemahaastattelu on tutkimusaineiston keräämisen metodi laadullisessa tutkimusmenetelmässä. (Ojasalo ym. 2014, 108; Vilka 2005, 101-102.)

Kehittämistyössä käytetään myös syvähaastattelua, jossa on tarkoitus haastateltavan kanssa keskustella luottamuksellisesti tutkittavasta aiheesta. Keskustelun tarkoituksena on syvällisen ymmärryksen lisääminen. Haastatteliija käyttää etukäteen valmistettua teemalistaa, mutta haastattelun aikana voi nousta esiin myös uusia teemoja. Syvähaastattelu on yksi aineiston keräämisen tavoista laadullisessa tutkimusmenetelmässä, mutta syvähaastattelu ei ole sama asia kuin laadullinen tutkimusmenetelmä. (Ojasalo ym. 2014, 109; Vilka 2005, 100.)

Käsitelty haastatteluaineisto analysoidaan, ja siitä pyritään löytämään yhteyksiä käytettyyn teoriaan. Tämän jälkeen tutkija palaa takaisin kokonaisuuteen ja tutkittavan asian tulkintaan. Haastattelujen laajuus ja lukumäärä vaikuttavat kerätyn aineiston käsittelyyn, mutta haastatteluaineiston analyysissä aineiston määrä ei korvaa laatua tai vaikuta siihen. Mitä avoimempi haastattelu on, sitä enemmän käytetään laadullisen aineiston käsittelymenetelmiä. (Ojasalo ym. 2014, 110-111.)

4 Ydinturvallisuus

Ydinenergialaissa on kirjaus ydinenergian käytöstä, minkä mukaan ydinenergian käytön on oltava yhteiskunnan kokonaisedun mukaista. Ihmisille, ympäristölle tai omaisuudelle ei saa aiheutua vahinkoa ydinenergian käytöstä. Ohjeistusta sovelletaan kaikkeen ydinenergian käyttöön Suomessa. (Ydinenergialaki 990/1987.)

Sosiaali- ja terveysministeriön hallinnonalaan kuuluva Säteilyturvakeskus (STUK) vastaa ydinturvallisuuden valvonnasta Suomessa. STUK varmistaa riippumattomalla valvonnalla, että toimitaan vaatimusten mukaisesti. (STUK valvoo N.d.; Ydinturvallisuus N.d.)

Ydinenergian käyttö on siis tarkkaan ohjeistettua ja valvottua Suomessa. Ihmisten, ympäristön ja omaisuuden turvaamiseksi ydinvoimalaitoksissa on useita turvallisuuden parantamiseen vaikuttavia tekijöitä. Turvallisuustoimenpiteillä halutaan varmistaa poikkeavien tilanteiden hallinta sekä viime kädessä estää radioaktiivisten aineiden vapautuminen ympäristöön.

4.1 Syvyysuuntainen turvallisuusajattelu

Syvyysuuntaisessa turvallisuusajattelussa reaktorivaurioiden turvallisuus ja säteilyn haitallisten vaikutusten estäminen varmistetaan usealla peräkkäisellä, toisiaan varmentavalla toiminnallisella tasolla. Turvallisuuden varmistamisessa voidaan erottaa ennalta ehkäisevä, suojaava ja lieventävä taso. (Syvyysuuntainen turvallisuusajattelu 2018.)

Syvyysuuntaisen turvallisuusajattelun ennalta ehkäisevän tason tarkoituksena on estää laitoksen normaalista käytöstä poikkeavat tapahtumat. Ydinvoimalaitoksen käyttötoiminnan edellytyksenä ovat korkeat laatuvaatimukset, joilla tarkoitetaan käyttötoiminnan lisäksi laitteiden suunnittelua, valmistusta, asennusta ja huoltoa. (Syvyysuuntainen turvallisuusajattelu 2018.)

Säteilyturvakeskuksen mukaan turvallisuusluokkien jaottelu tehdään laitteiden turvallisuusmerkityksen mukaan. Korkeamman turvallisuusluokan omaavalta laitteelta edellytetään korkeampaa laatua suunnittelun, valmistuksen ja kunnossapidon osalta. Säteilyturvakeskus mainitsee suunnittelun osalta erityisesti reaktorin suunnittelun siten, että reaktorin tehon hallitsematon kasvu estetään luontaisilla takaisinkytkennöillä. (Syvyysuuntainen turvallisuusajattelu 2018.) Reaktoritehon luontaiset takaisinkytkennät käsitellään yksityiskohtaisemmin myöhemmässä vaiheessa. Kehittämissä tutkitaan alikriittisyyteen vaikuttavia tekijöitä polttoaineenvaihtoseisokissa, jolloin reaktorin pitäisi olla sammutettu ja syvästi alikriittinen.

Suojaavan tason tarkoituksena on varautua käyttöhäiriöihin ja onnettomuuksiin järjestelmin, joiden tehtävänä on havaita häiriöt ennen niiden kehittymistä vakavaksi onnettomuudeksi. Suojaavan tason järjestelmillä varmistetaan reaktorin pysäytys, reaktorisydämen jäähdytys sekä jälkilämmön poisto, jotka ovat erityisen tärkeitä toimintoja. (Syvyysuuntainen turvallisuusajattelu 2018.)

Syvyysuuntaisen turvallisuusajattelun kolmannen, lieventävän tason tarkoituksena on lieventää onnettomuuden seurauksia, mikäli onnettomuuden eteneminen ei pysähdy ensimmäisen ja toisen tason toiminnoista huolimatta. Tällaisessa tilanteessa tärkeintä on varmistaa reaktorin suojarakennuksen säilyminen ehjänä ja suojarakennukseen liittyvien järjestelmien toiminta. (Syvyysuuntainen turvallisuusajattelu 2018.)

Sandbergin (2004, 101) mukaan turvallisuusajattelun neljäntenä ja viidentenä tasona voidaan pitää valmius- ja pelastusjärjestelyjä sekä vakavaan onnettomuuteen tarkoitettuja erilaisia onnettomuudenhallintamenetelmiä. Toisaalta vakavan onnettomuuden mahdollisuus on erittäin pieni toimivassa ydinvoimalaitoksessa syvyysuuntaisen turvallisuusajattelun ansiosta.

Syvyysuuntainen turvallisuusajattelu pitää sisällään edellä mainittujen toiminnallisten tasojen lisäksi radioaktiivisten aineiden peräkkäisten leviämisseiden periaatteen sekä useita hyvän laadunhallinnan ja suunnittelun periaatteita. Leviämisseiden tarkoituksena on rajoittaa onnettomuustilanteessa ydinpoltoaineessa syntyvien

radioaktiivisten fissiotuotteiden pääsyä ympäristöön. Leviämisesteitä ovat polttoaine, primääripiiri ja suojarakennus. (Sandberg 2004, 97, 101.)

Polttoaineen keraaminen rakenne ja polttoaineensuojakuori muodostavat ensimmäisen leviämisesteen. Sandbergin (2004) mukaan reaktorin pysäytyksellä, reaktorisydämen jäähtymällä sekä jälkilämmön poistolla varmistetaan polttoaineen suojuokoren pysyminen ehjänä. Toisen leviämisesteen muodostaa primääripiiri, jolla tarkoitetaan reaktoripaineastiaa ja siihen liittyvien putkistojen ja venttiilien muodostamaa tiivistä ja paineenkestävää kokonaisuutta. Kolmannen leviämisesteen muodostaa kaasutiivis suojarakennus, joka ympäröi primääripiiriä. Sandbergin mukaan varsinaisen suojarakennuksen lisäksi on usein ympärillä ulompi suojarakennus, jonka avulla rakennusten välissä oleva tila pystytään pitämään alipaineisena onnettomuustilanteissa ulkoilmaan nähden. (Sandberg 2004, 97, 101.)

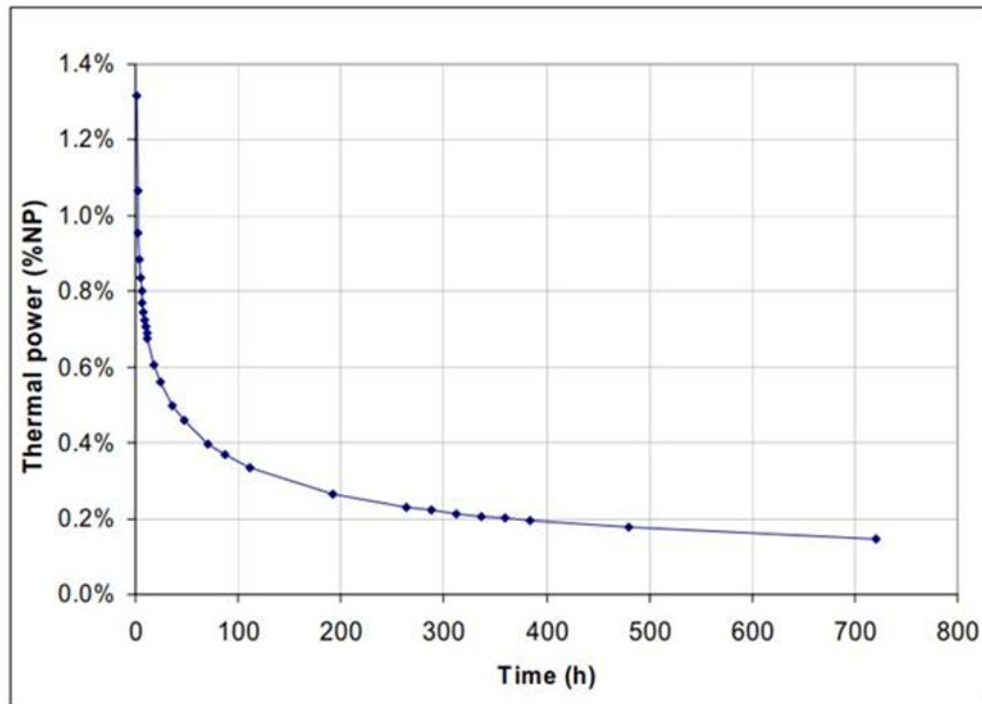
OL3:lla on kolmannen leviämisesteen turvallisuuden varmistamiseksi rakennettu suojarakennukseen kaksoiseinä. Sisemmän suojarakennuksen tarkoitus on estää radioaktiivisuuden pääsy ympäristöön ja ulomman suojarakennuksen tarkoitus on turvata ulkoisilta uhilta, kuten lentokoneen törmäykseltä. (Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3 2014, 9.) Syvyysuuntainen turvallisuusajattelu on huomioitu hyvin nykyajan ydinvoimalaitoksissa. Vapautumisesteistä yhdenkin tiiveys riittää estämään radioaktiivisuuden pääsyn ympäristöön.

4.2 Jälkilämpöteho

Ydinpolttoaineeseen kertyy käytön aikana radioaktiivisia fissiotuotteita, joiden hajotessa vapautuvaa energiaa sanotaan jälkilämmöksi. Jälkilämpö on välttämätöntä poistaa reaktorista, jotta polttoaineen eheys säilytetään. Jälkilämpötehoa syntyy myös reaktorin pysäytyksen jälkeen. (Sandberg 2004, 58-59.)

Kuviosta 4 voidaan todeta, että lämpöteho on heti reaktorin pysäytyksen jälkeen noin 7 % pysäytystä edeltäneestä lämpötehosta. Lämpöteho pienenee aluksi nopeasti, joten yhden tunnin kuluttua lämpöteho on noin 1 % pysäytystä edeltäneestä

lämpötehosta. Vuorokauden kuluttua lämpöteho on noin 0,6 % pysäytystä edeltäneestä lämpötehosta. OL3-reaktorin terminen teho on 4300 MW, joten laitoksen jälkiteho on heti pysäytyksen jälkeen noin 300 MW, yhden tunnin kuluttua noin 43 MW ja vuorokauden kuluttua noin 26 MW.



Kuvio 4. Jälkilämpöteho. (Residual heat calculation 2005).

Painevesireaktorissa jälkilämpö poistetaan normaalin pysäytyksen jälkeen aluksi höyrystimien kautta sekundääripiiriin ja edelleen lauhduttimeen käyttäen samoja järjestelmiä kuin laitoksen tuottaessa sähköä. Erillistä jälkilämmönpoistojärjestelmää ja siihen liittyvää jäähdytysketjua käytetään myöhemmässä vaiheessa. Jäähdytysketjun muodostavat jälkilämmönpoistojärjestelmä, välijäähdytysjärjestelmä ja merivesijärjestelmä sekä näiden järjestelmien välillä olevat lämmönsiirtimet. (Sandberg 2004, 58-59.)

4.3 Turvallisuustekniset käyttöehdot

Ydinvoimalaitoksen turvallisuustekniset käyttöehdot (TTKE) on yksi laitoksen käytön ja valvonnan kannalta keskeinen asiakirja. Ydinvoimayhtiön on noudatettava TTKE:n

määräyksiä laitoksen käytössä. TTKE:ssa esitetään vaatimukset turvallisuuden kannalta tärkeiden järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden toimintakyvyn varmistamiseksi. TTKE:ssa esitetään myös rajoitukset, joita on noudatettava laitteiden vikaantuessa. Tällaisia ovat järjestelmien käyttökuntoisuutta koskevat vaatimukset, joissa on mainittu laitteiden korjauksille enimmäisajat laitoksen käytön aikana. Raja-arvoja ja vaatimuksia asetetaan myös järjestelmien prosessisuureille. TTKE:ssa esitetään myös hallinnollisia vaatimuksia laitoksen valvomohenkilökunnan ja muun käyttöhenkilökunnan vähimmäismäärille käytön aikana. (Sandberg 2004, 396-397.)

TTKE:n sisältö voidaan jakaa seuraaviin osa-alueisiin: käyttö ja soveltaminen, turvallisuusrajat, vaatimusosio sisältäen perusteluosion, suunnitteluominaisuudet ja hallinnolliset toimintaperiaatteet. Käyttö ja soveltaminen -luku sisältää käytettyjen termien määritelmät ja käyttörajoitusaikojen muodostumisen. Turvallisuusrajat-luvussa esitetään tärkeiden prosessimuuttujien turvallisuusrajoja, jotta polttoaineen suoja-kuoren ja primääripiirin eheys voidaan varmistaa. Vaatimusosiossa on määritelty järjestelmien osalta käyttökuntoisuusvaatimukset. Järjestelmien riittävän toimintakyvyn varmistaminen on tärkeää, jotta se suoriutuu turvallisuustehtävästään. Luku sisältää myös toimenpiteet poikkeamatilanteissa sekä käyttörajoitusaikat, joiden aikana poikkeamat tulee poistaa. Vaatimusosiossa on myös määritelty määräaikaikokeet sekä niiden suoritusvälit. Vaatimusosaan liittyy erillinen perusteluosio, jossa on esitetty tarkemmin vaatimusosion taustaa ja selvitetään vaatimusten yhteys turvallisuusanalyysiin. Suunnitteluominaisuudet-luvussa esitetään ydinvoimalaitoksen rakenteellisia vaatimuksia, jotka voivat vaikuttaa laitoksen turvallisuuteen. Hallinnolliset toimintaperiaatteet -luku sisältää ne toimenpiteet, joilla ylläpidetään laitoksen turvallista käyttötapaa ja hallinnollisia menettelytapoja. (Turvallisuustekniset käyttöehdot 2017.)

TTKE:ssa esitetään vaatimuksia alikriittisyyden varmistamiseksi polttoaineenvaihdon aikana. Tällaisia vaatimuksia ovat boorikonsentraatio polttoaineenvaihdon aikana, joka pitää olla yli 1550 ppm. Booraamattomien vesilähteiden eristysventtiilit täytyy olla kiinni. Polttoaineenvaihdossa käytettävien neutronivuodetektorien on oltava käyttökuntoisia. Neutronivuodetektorien toimintaa käsitellään tarkemmin instru-

mentoinnin yhteydessä. Lisäksi suojarakennuksen läpivienneille, kuten polttoaineensiirtoputkelle on asetettu vaatimuksia polttoaineenvaihdon yhteydessä. Näiden lisäksi on vaatimuksia reaktorialtaan pinnankorkeudelle ja jälkilämmönpoistolle polttoaineenvaihtotoimintojen aikana. (Turvallisuustekniset käyttöehdot 2017.)

4.4 Turvallisuusjärjestelmien suunnitteluperusteet

Turvallisuusjärjestelmien suunnittelun tarkoituksena on varmistaa turvallisuuden kannalta tärkeiden toimintojen luotettavuus. Tämän varmistamiseksi ydinvoimaloissa käytetään rinnakkaisperiaatetta, erotteluperiaatetta, erilaisuusperiaatetta, turvallisen tilan periaatetta ja turvallisuustoimintojen automaattista käynnistymistä. (Sandberg 2004, 102.)

Rinnakkaisperiaate

Rinnakkaisperiaatteessa turvallisuusjärjestelmät on jaettu toisiaan korvaaviksi osajärjestelmiksi. Turvallisuustoiminnon hoitamiseksi on samalla periaatteella toimivia rinnakkaisia osajärjestelmiä. Suunnittelun tarkoituksena on varmistaa, että järjestelmä pystyy toteuttamaan turvallisuustoimintonsa kaikissa tilanteissa. Turvallisuustoiminto toteutuu yksittäisen järjestelmän ollessa poissa käytöstä. (Sandberg 2004, 102-103.)

Erotteluperiaate

Erotteluperiaatteella tarkoitetaan fyysistä ja toiminnallista erottelua. Fyysisessä erottelussa turvallisuusjärjestelmien toisiaan varmentavat osajärjestelmät sijoitetaan eri tiloihin. Tällä pyritään estämään ulkoisesta syystä johtuva turvallisuusjärjestelmien samanaikainen vikaantuminen. Toiminnallisessa erottelussa pyritään välttämään rinnakkaisten järjestelmien keskinäistä vuorovaikutusta. (Sandberg 2004, 103-104.)

Erilaisuusperiaate

Erilaisuusperiaatteella tarkoitetaan sitä, että sama turvallisuustoiminto voidaan toteuttaa eri toimintaperiaatetta käyttävillä järjestelmillä. Erilaisuusperiaate lisää luotettavuutta ja poistaa yhteisvikojen mahdollisuuksia. Erilaisuusperiaatetta noudattamalla pienennetään turvallisuusjärjestelmien samasta syystä aiheutuvan samanaikaisen vikaantumisen mahdollisuutta. Erilaisuusperiaatetta käytetään yleisesti reaktorin pysäyttämiseksi kahdella eri reaktiivisuuden hallintajärjestelmällä, jotka ovat säätösauvat ja booriliuoksen syöttäminen reaktoriin. (Sandberg 2004, 103-104.)

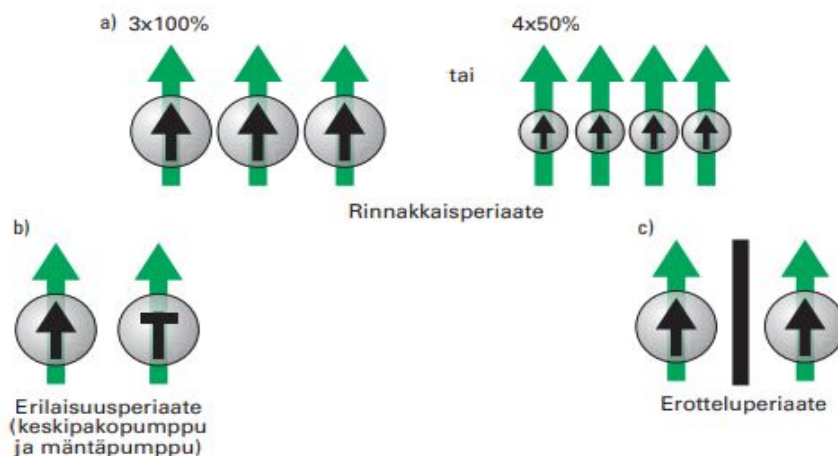
Turvallisen tilan periaate

Turvallisen tilan periaatteella tarkoitetaan sitä, että poikkeavassa tilanteessa, kuten käyttövoiman menetyksessä, järjestelmä tai laite menee luontaisesti turvalliseen tilaan laitoksen toiminnan kannalta. Tämä periaate on käytössä suojausjärjestelmän suunnittelussa, jonka avulla käynnistetään turvallisuusjärjestelmiä. (Sandberg 2004, 104.)

Turvallisuustoimintojen automaattinen käynnistyminen

Turvallisuustoimintojen automaattista käynnistymistä ohjaavat suojausjärjestelmät on suunniteltu siten, että jokaista tehtävää varten on neljä rinnakkaista laitetta kahden riittäessä turvallisuusjärjestelmän käynnistämiseen. Tämä varmistaa myös sen, että yksittäinen aiheeton signaali ei käynnistä turvallisuustoimintoa. (Sandberg 2004, 102.)

Kuvio 5 havainnollistaa ymmärtämään turvallisuusjärjestelmien suunnitteluperiaatetta. Kuvioista havaitaan myös, että ydinvoimalaitoksessa rinnakkaisperiaatteella toimivat järjestelmät voivat olla 3*100 % varmennettuja tai 4*50 % varmennettuja.



Kuvio 5. Turvallisuusjärjestelmien suunnitteluperiaatteet. (Sandberg 2004, 103).

5 Painevesilaitos

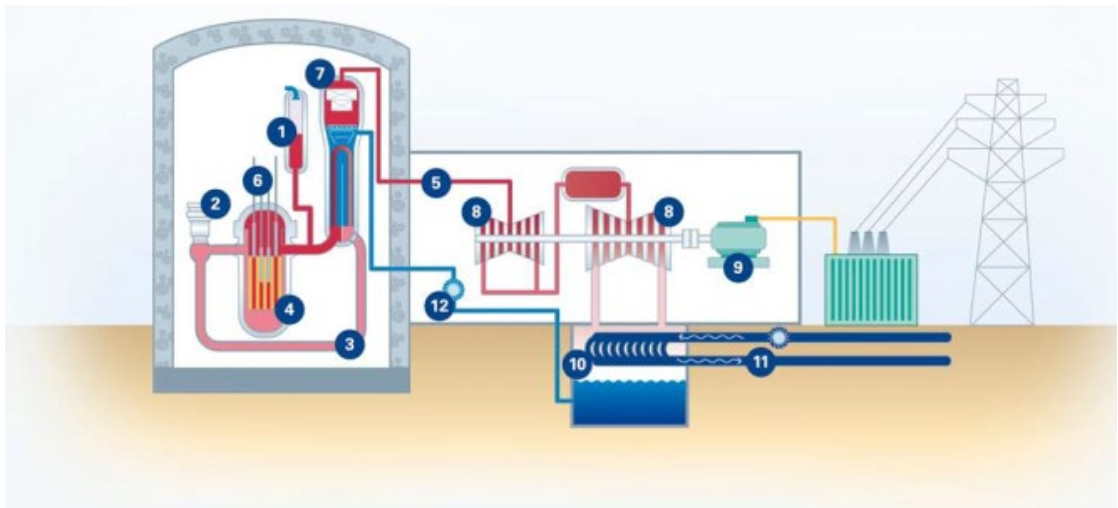
Suurimmassa osassa maailman ydinvoimalaitoksista on kevytvesireaktori, joita on painevesireaktoreita ja kiehutusvesireaktoreita. Painevesilaitos on maailmanlaajuisesti yleisin reaktorityyppi. Painevesilaitoksessa moderaattorina eli hidastimena käytetään vettä, joka toimii myös jäähdytteenä. Veden sisältämä vety absorboi neutroneja tehokkaasti pienentäen reaktorin kasvutekijää, minkä vuoksi polttoaineena käytetään väkevöityä uraania. U-235-isotoopin osuus polttoaineessa on kolmesta viiteen prosenttia. Polttoaine on uraanidioksidia. (Sandberg 2004, 42-44.)

5.1 Toimintaperiaate

OL3-laitosyksikkö on laitostyyppiltään painevesireaktori, jonka toimintaperiaatetta havainnoidaan kuviolla 6. Painevesireaktorissa on kaksi jäähdytyspiiriä: primääripiiri ja sekundääripiiri. Primääripiirin paine pidetään paineistimen avulla korkeana, jonka ansiosta primäärin jäähdyte pysyy nesteenä lukuun ottamatta paineistinta. Painevesireaktorin primääripiirissä syntyvä lämpö siirretään sekundääripiiriin höyrystimissä. Sekundääripiirin pienemmästä paineesta johtuen höyrystimiin syötetty syöttövesi

muuttuu höyryksi. Höyrystimissä tuotettu höyry johdetaan höyrylinjoja pitkin turbiineille, jossa se turbiinien ja generaattorin avulla muutetaan sähköenergiaksi. (Sandberg 2004, 45-46.)

Primääripiirissä pääkiertopumppujen avulla kiertävä jäähdyte johdetaan reaktorin sydämen läpi, jolloin se lämpenee reaktorisydämessä tapahtuneen fission vaikutuksesta. Lämmennyt jäähdyte kierrätetään höyrystimessä olevien primääripiirin tuubien lävitse takaisin reaktoriin. Sekundääripiirin syöttövesi pumpataan syöttövesipumppujen avulla höyrystimeen, jossa se höyrystyy pienemmästä paineesta johtuen. Tuotettu höyry johdetaan korkeapaineturbiinille höyrylinjoja pitkin. Korkeapaineturbiinin jälkeen höyry johdetaan välitulistimille, jossa se kuivataan ja tulistetaan. Välitulistimien jälkeen höyry johdetaan matalapaineturbiineille, jonka jälkeen höyry lauhdutetaan lauhduttimessa meriveden avulla takaisin vedeksi. Lauhduttimesta lauhde pumpataan syöttövesisäiliön ja esilämmittimien kautta takaisin reaktoriin. (Sandberg 2004, 44-48; Ydinsähköä Olkiluodosta 2012, 10.)



Kuvio 6. Painevesireaktorin toimintaperiaate. (Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3. 2014, 4).

5.2 Käyttötilat

Käyttötila on sellainen reaktorin tila, joka täyttää taulukon 1 sarakkeessa käyttötilan muuttumiseen määritetyt kriteerit (Turvallisuustekniset käyttöehdot 2017). OL3-käyttötiloja ovat tehoajo, kuuma sammutustila, kylmä sammutustila, kylmä seisokki, polttoaineenvaihto ja reaktorisydän tyhjennetty.

Taulukosta 1 havaitaan, että laitoksen alasajon aikana tehoajolta siirrytään käyttötilaan kuuma sammutustila, kun kaikki säätösauvat ovat sydämessä. Kylmä sammutustilaan siirrytään, kun kuumen haaran lämpötila on alle 120 astetta. Kylmä seisokkiin siirrytään, kun vähintään yksi reaktoripaineastian kannen pulteista on vain osittain kiristetty. Käyttötilaan polttoaineenvaihtoon siirrytään, kun reaktorin kuilun pinta on vähintään 18,95 metriä. Reaktorisydän tyhjennetty -käyttötila saavutetaan, kun reaktorisydän tyhjennetty -signaali on määritetty. Taulukosta 1 havaitaan, että vastavasti ylösajossa reaktorisydän tyhjennetty -käyttötilasta siirrytään polttoaineenvaihto-käyttötilaan, kun reaktorisydän tyhjennetty -signaali on nollattu. Kylmä seisokkiin siirrytään, kun reaktorikuilun pinta on alle 18,95 metriä. Kylmä sammutustilaan siirrytään, kun kaikki reaktoripaineastian kannen pultit ovat täysin kiristetty. Kuuma sammutustilaan siirrytään, kun kuumen haaran lämpötila on vähintään 120 astetta. Tehoajolle siirrytään, kun ensimmäisen säätösauvan ulosveto aloitetaan.

Taulukko 1. OL3 käyttötilat. (Turvallisuustekniset käyttöehdot 2017).

KÄYTTÖTILAT	KÄYTTÖTILAT	KÄYTTÖTILAN MUUTTUMISEN KRITTEERI	PRIMÄÄRIPIIRIN BOORIPITOISUUS
PO	TEHOAJO	≥1 säätösauva ulosvedettynä	Kriittinen booripitoisuus C ≥ C _{TC} C ≥
SG-SD	KUUMA SAMMUTUSTILA	Kaikki säätösauvat sisään työnnettynä (1) Primääripiirin kuuman haaran lämpötila ≥ 120 °C	C ≥ C _{CZP}
RHR-SD (2) (3)	KYLMA SAMMUTUSTILA	Primääripiirin kuuman haaran lämpötila < 120 °C	C ≥ C _{CZP} KYLMA SAMMUTUSTILA primääripiirin kuuman haaran lämpötilan ollessa > 55 °C (Ainakin yksi pääkiertopumppu toiminnassa)
		Kaikki reaktoripaineastian pultit täysin kiristetty	C ≥ 1 550 ppm (C _{RE}) KYLMA SAMMUTUSTILA primääripiirin kuuman haaran lämpötilan ollessa ≤ 55 °C (Kaikki pääkiertopumput pysähdyksissä)
RLL	KYLMA SEISOKKI	Yksi tai useampi reaktoripaineastian pultti vain osittain kiristetty Reaktorialtaan pinnankorkeus < 18,95 m	C ≥ 1 550 ppm (C _{RE})
RHL	POLTTOAI-NEENVAIHTO	Reaktorialtaan pinnankorkeus ≥ 18,95 m Reaktorisydän tyhjennetty - signaali nollattu	C ≥ 1 550 ppm (C _{RE})
CO	REAKTORISYDÄN TYHJENNETTY	Reaktorisydän tyhjennetty - signaali määritetty	Ei sovellettavissa

5.3 Määräaikaiskokeet

Määräaikaiskokeiden tarkoituksena on määrittää laitteiden toimintakuntoisuus ja niille asetettujen vaatimusten täyttyminen. Turvallisuusteknisissä käyttöohjeissa on määritelty sallitut raja-arvot, minkä perusteella määräaikaiskoe voidaan hyväksyä. Organisaatioyksiköt vastaavat itsenäisesti siitä, että omalle vastuualueelle kuuluvat kokeet ovat mukana seurantajärjestelmässä ja kokeet ovat asianmukaisesti suoritettu ja hyväksytyt. (Määräaikaiskokeet 2019, 3.)

Aamupalaverilistalta nähdään tulevan vuorokauden aikana tehtävät kokeet ja mahdolliset rästilistalla olevat kokeet. Määräaikaiskoe siirtyy rästilistalle, mikäli kahden peräkkäisen kokeen välinen aika ylittyy yli 20 %:lla. Turvallisuusjärjestelmissä on ennen määräaikaiskokeen suoritusta varmistuttava, että kaikki osajärjestelmät ovat käyttökuntoisia. Tarkoituksena on välttää tilanne, jossa useita osajärjestelmiä olisi käyttökunnottomia samanaikaisesti. Vuosihuollon aikana kerran vuodessa tehtävien kokeiden suoritusohjeet ovat kansiossa. Kansio on jaettu kolmeen osaan: kylmä seisokissa tehtävät kokeet, ylösajon aikana tehtävät kokeet ja tehoajolla tehtävät kokeet. (Määräaikaiskokeet 2019, 5-6.)

Määräaikaiskoe voi jäädä suorittamatta erilaisista syistä, kuten työluvasta, käyttötilasta tai kiireestä johtuvista syistä. Työluvasta johtuvasta syystä komponentti todetaan käyttökunnottomaksi, kunnes työlupa on palautettu ja määräaikaiskoe suoritettu hyväksytysti. Käyttötilasta johtuvasta syystä seuraava määräaikaiskoe suoritetaan suunniteltuna ajankohtana, jos koeväli on alle kaksi viikkoa. Määräaikaiskoe suoritetaan mahdollisimman pian käyttötilan salliessa, mikäli koeväli on yli kaksi viikkoa. Määräaikaiskokeen suoritus siirtyy seuraavan vuoron tehtäväksi, mikäli koetta ei ehditä tekemään kiireestä johtuvasta syystä. Määräaikaiskokeissa havaituista epänormaaleista toiminnoista laaditaan tarvittaessa työtilaus tai vikailmoitus, jolloin korjaavat toimenpiteet asian kuntoon saattamiseksi on saatu käyntiin. (Määräaikaiskokeet 2019, 6-7.)

Laitoksella suoritetaan määräaikaiskokeita myös käyttötilassa polttoaineenvaihto, jota kehittämistyö käsittelee. Polttoaineenvaihdon aikana määräaikaiskokeiden suorituksessa varmistutaan, että laitos pystytään pitämään turvallisessa tilassa kokeiden suoritukselta huolimatta. Turvallisuusteknisten käyttöohjeiden noudattamisella varmistetaan turvallisuus.

5.4 Käyttömääräin

Käyttömääräin on hallinnollinen työväline, jolla annetaan määräyksiä laitoksen käyttötilaa tai tehoa koskevista muutoksista sekä muista merkittävistä kokeista ja kor-

jaustoimenpiteistä. Käyttömääräimellä annetaan myös määräyksiä vuosihuollossa reaktoriin kohdistuvista ydinpolttoaineen ja säätösauvojen käsittelyyn liittyvistä toimenpiteistä. Merkittävistä muutoksista laaditaan aina uusi käyttömääräin, mutta pienet muutokset tehdään käsin käyttömääräimessä olevaan kuittauskappaleeseen. Käyttömääräimen hyväksyjä päättää muutoksen merkittävydestä. (Käyttömääräin 2017, 3-4.)

Käyttömääräin sisältää seuraavat osiot: yleistä, aikataulu, henkilökunta, edellytykset, suoritus, poikkeaminen TTKE:sta sekä liitteet. Tarvittaessa käyttömääräin voi sisältää muitakin kohtia. Poikkeaminen TTKE:sta vaatii etukäteen STUK:n hyväksynnän poikkeamiselle. (Käyttömääräin 2017, 4-5.)

5.5 Työlupakäytäntö

Työluvalla varmistetaan työn turvallinen suoritus siten, että laitos- ja henkilöturvallisuus varmistetaan. Työluvalla hallitaan töitä varten tehtäviä erotus- ja palautustoimenpiteitä. Työ lupa laaditaan aina, kun työkohteeseen kuuluu TTKE:n alaisiin laitteisiin. Työ lupa laaditaan myös silloin, kun työn johdosta joudutaan tekemään prosessiin tai sen laitteisiin työ- tai laitosturvallisuuteen vaikuttavia toimenpiteitä. Reaktorirakennuksessa tehtäviltä töiltä edellytetään yleensä aina työlupaa, koska siellä tehtävillä töillä on mahdollisuus vaarantaa TTKE:n alaisten järjestelmien toimintaa. Sähköisissä erotuksissa tarvitaan aina työ lupa. (Työtilausjärjestelmän käyttöohje 2019, 23-24.)

Vuosihuollon aikana työ lupa toimitetaan työ lupakonttoriin. Työ lupakonttori määrittää työ luvan erotus- ja palautustoimenpiteet. Tämän jälkeen työ lle määritellyt turvatoimet valmistellaan. Turvatoimien valmistelujen jälkeen työ lupa oikeuttaa työskentelemään työ luvassa määritellyillä kohteilla. Työ luvan luovuttamisen yhteydessä vaihetteluun merkitään työ luvan voimassaoloaika. Työn päättyessä työ merkitään suoritetuksi. Tämän jälkeen suoritetaan työn palautustoimenpiteet, kun palautus edellytykset ovat täyttyneet. Palautuksen edellytysten täyttymisessä on huomioitava, että palautettavan työn turvatoimilla saattaa olla tehtynä muidenkin työ lupien turvatoimia. Turvatoimien palautuksen jälkeen suoritetaan toimintakoe, jonka tarkoituksena on varmistaa huolletun tai korjatun kohteen oikea toiminta ja käyttökuuntoisuus.

Työluvasta on käytävä selvästi ilmi osajärjestelmä, jota työlupa koskee. Turvallisuuden kannalta tärkeiden järjestelmien käyttökuntoisuuteen vaikuttavaa työlupaa ei saa toteuttaa, mikäli järjestelmän rinnakkaiset osat eivät ole käyttökuntoisia. (Työtillausjärjestelmän käyttöohje 2019, 29-32.)

5.6 Polttoaineenvaihto

Ensimmäinen polttoainelataus on mahdollista suorittaa, kun STUK on myöntänyt latausluvan. Polttoainelataus suoritetaan yhtäjaksoisesti ja sen suunniteltu kesto on noin viisi vuorokautta. OL3:n ensimmäisessä latauksessa TTKE tulee voimaan ensimmäistä kertaa kokonaisuudessaan. Polttoainelataukselle laaditaan myös käyttömääräin, jolla annetaan määräyksiä vuosihuollossa reaktoriin kohdistuvista ydinpolttoaineen ja säätösauvojen käsittelyyn liittyvistä toimenpiteistä. Polttoainelatauksen turvallisuusperiaatteet ovat samat kaikissa latauksissa, vaikka laitoksen ensimmäinen lataus poikkeaa osittain myöhemmistä latauksista. Ensimmäisessä latauksessa noudatettavaa vaihekoeohjelmaa säilytetään latauksen valvojalla reaktorirakennuksessa ja lataukseen liittyviä yksityiskohtaisempia ohjeita polttoaineenkäsittelyorganisaatiolla latauksen aikana.

5.6.1 Organisaatio

Polttoaineenkäsittelyorganisaatio koostuu latauksen valvojista, polttoainesiirtojen valvojista ja polttoaineenkäsittelijöistä. Tämän lisäksi polttoaineenkäsittelyorganisaation tukena on lisäksi henkilöitä eri organisaatioista. OL3:n ensimmäisestä polttoaineen latauksesta vastaa laitoksen tilaajan ja toimittajan muodostama yhteisorganisaatio. (OL3-lataussuunnitelma 2019, 5.)

Latauksen valvoja

Polttoaineenkäsittelyorganisaatio koostuu latauksen valvojasta, joka on vastuussa polttoaineenlatauksen koordinoinnista. Latauksen valvoja huolehtii, että lataus tehdään aikaisemmin esitetyn vaihekoeohjelman mukaisesti. Latauksen valvoja on fyysisesti reaktorirakennuksessa koko polttoainelatauksen ajan. Polttoainelataukseen

osallistuvat henkilöt raportoivat latauksen valvojalle. Latauksen valvojalla on käytävissä jatkuva puhelinyhteys valvomoon. Erillinen latauksen valvoja on vain ensimmäisessä polttoaineenlatauksessa. Tulevaisuudessa latauksen valvojan tehtävät jaetaan polttoaineensiirtovalvojen kesken. (OL3-lataussuunnitelma 2019, 5-6; Phase Commissioning Program for First Core Loading 2019, 36-37.)

Polttoainesiirtojen valvoja

Reaktori- ja polttoainerakennuksessa on polttoainesiirtojen valvoja latauksen aikana. Polttoainelatauksen aikana siirtojen valvojen tehtävänä on käyttää polttoainesiirtojen valvontalaitteistoa (CCU) ja polttoaineen siirtolaitteistoa. Reaktorirakennuksen siirtojen valvoja vastaa polttoaineen siirron tarkistamisesta ennen suorittamisen aloittamista sekä valvoo polttoaineenkäsittelytoimenpiteiden suoritusta reaktorirakennuksessa. Vastaavasti polttoainerakennuksen siirtojen valvoja valvoo polttoaineenkäsittelytoimenpiteiden suoritusta polttoainerakennuksessa. Eri rakennuksissa olevat siirtojen valvojat ovat jatkuvassa puhelinyhteydessä keskenään sekä molemmissa rakennuksissa työpisteen vieressä istuvaan siirtokoneen kuljettajaan. Polttoainesiirtojen valvojen työpiste on reaktorirakennuksessa reaktorialtaan pohjoisreunalla. Polttoainerakennuksen siirtojen valvojan työpiste on allastasoja korkeammalla olevalla tasanteella. (OL3-lataussuunnitelma 2019, 6-7; Phase Commissioning Program for First Core Loading 2019, 36-37.)

Polttoaineenkäsittelijät

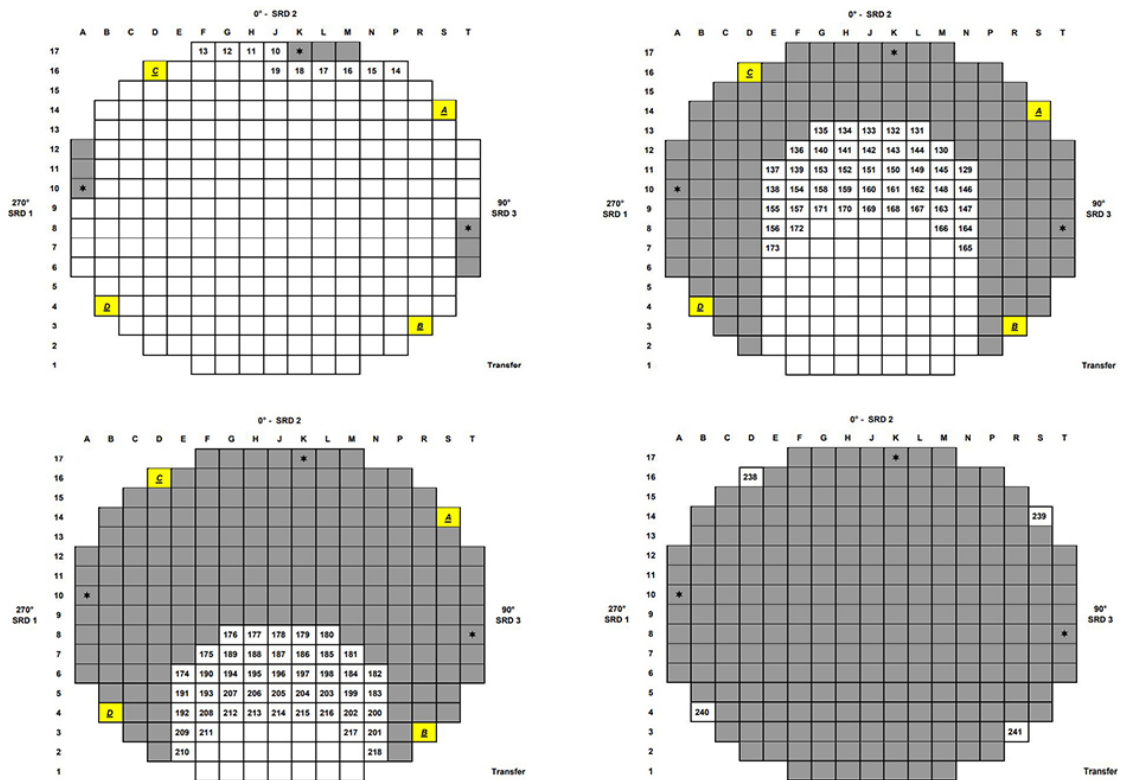
Polttoaineenkäsittelijät toimivat polttoaineensiirtokoneiden kuljettajina polttoainesiirtojen valvojen antamien ohjeiden mukaisesti. Reaktorirakennuksen polttoaineenkäsittelijä käyttää latauskonetta ja polttoainerakennuksen polttoaineenkäsittelijä polttoaineensiirtokonetta. Kummankin fyysinen sijainti latauksen aikana on polttoainesiirtojen valvojan välittömässä läheisyydessä kyseisessä rakennuksessa. Siirtojen valvojat ovat jatkuvassa yhteydessä vieressä istuviin siirtokoneen kuljettajiin molemmissa rakennuksissa. (OL3-lataussuunnitelma 2019, 8; Phase Commissioning Program for First Core Loading 2019, 36-37.)

Tukiorganisaatiot

Polttoaineenkäsittelijöitä tukevat ydinmateriaalivalvonnasta vastaava, polttoaineen-tarkastajat ja polttoainetoimittajan tekniset tukihenkilöt. Näiden lisäksi polttoaineenkäsittelyorganisaatiolla on tukena polttoaineyksikkö, käyttöönotto-organisaatio, kunnossapito, kemia, säteilysuojelu ja käyttöorganisaatio. Ongelmatilanteissa kunnossapito ja käyttöönotto-organisaatio ovat keskeisessä asemassa. Normaalin toiminnan aikana käyttöorganisaatio on tärkeässä asemassa. Sen tehtävänä polttoainelatauksen aikana on valvoa, että laitos säilyy turvallisessa tilassa ja polttoainelataus etenee käyttökäsikirjan vuosihuolto-ohjeen mukaisesti. Lisäksi käyttöorganisaatio valvoo TTKE:n noudattamista polttoainelatauksen aikana. (OL3-lataussuunnitelma 2019, 8-9.)

5.6.2 Polttoainelatauksen periaate

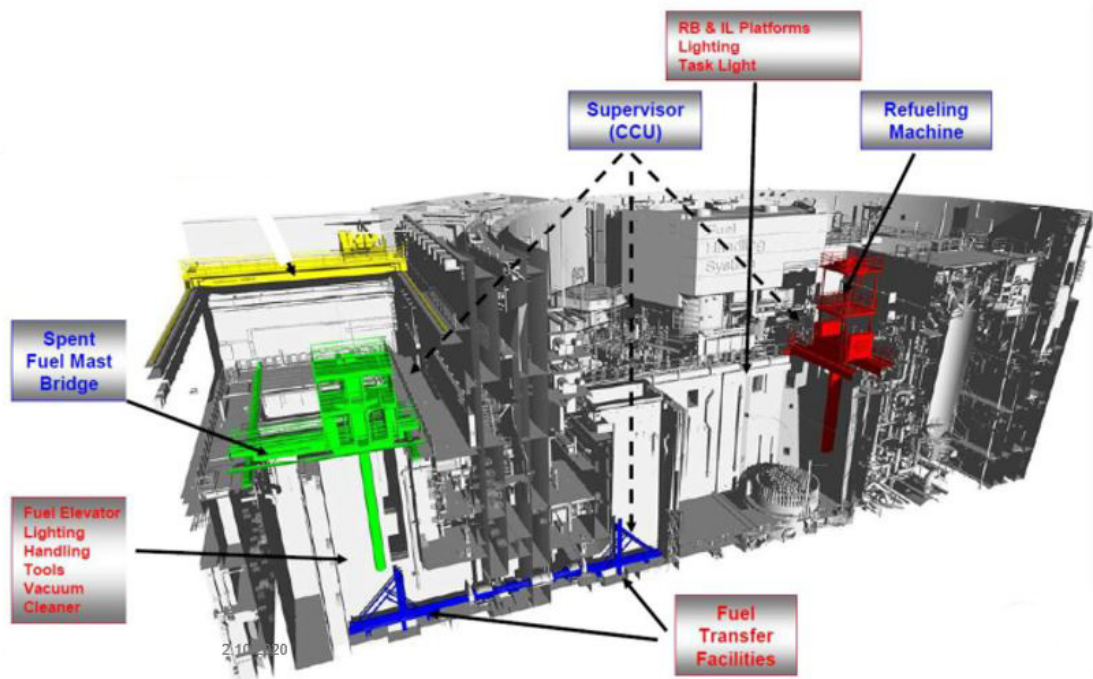
Polttoaineniput ovat varastoituna käytetyn polttoaineen altaisiin optimaaliseen järjestykseen latauksen kannalta. Polttoainenippujen sijoittelu tarkastetaan ennen polttoainelatausta. Kuviosta 7 havaitaan, että polttoainelataus suoritetaan lataamalla ensin lähdealueen neutronivuonilmaisimien (SRD) ympäristö. Tämän jälkeen ladataan reaktorin kaikki sivut lukuun ottamatta polttoainerakennuksen puolta. Viimeisenä ladataan reaktorin keskikohta ja polttoainerakennuksen puoli reaktorista. Latauksen oikeellisuus varmistetaan sydämen lopputarkastuksessa, johon osallistuvat IAEA, Euratom ja STUK. (Phase Commissioning Program for First Core Loading 2019.)



Kuvio 7. Latausjärjestys. (Phase Commissioning Program for First Core Loading 2019, 63, 87, 89, 95.)

Polttoaineen siirrot suoritetaan etukäteen määrätyn siirtojärjestyksen mukaan, joka on tallennettuna CCU:lle. Siirtojen valvoja tarkistaa jokaisen siirron ennen suoritusta. Siirtojen valvojat päivittävät myös paperisia siirtodokumentteja siirtojen etenemisen mukaan CCU:n hyväksynnän lisäksi. Latauksessa polttoainerakennuksessa oleva siirtojen valvoja antaa luvan siirron toteutukselle, ja siirtojen valvojan hyväksynnän jälkeen tiedot siirtyvät polttoaineensiirtokoneelle. Polttoaineen käsittelijä noutaa siirrettävän polttoainepipun ja sen sisäosat altaasta ja siirtää sen polttoaineen siirtolaitteiston koriin. Siirtojen valvoja tarkistaa polttoainepipun tunnuksen nostettaessa nippua polttoainealtaasta. Polttoainerakennuksen siirtojen valvoja siirtää polttoainepipun sisältävän siirtolaitteiston korin reaktorirakennuksen puolelle ja informoi asiasta reaktorirakennuksen siirtojen valvojaa. Reaktorirakennuksessa siirtojen valvoja tarkistaa siihen tarkoitetulla kameralla polttoainepipun ja sen sisäosan tunnuksen oikeellisuuden. Tunnistuksen jälkeen reaktorirakennuksen siirtojen valvoja hyväksyy siirron suorittamisen ja tiedot siirtyvät latauskoneelle. Reaktorirakennuksen lataus-

koneen kuljettaja siirtää polttoainepun reaktoriin oikeaan kohtaan, jossa lähdealueen neutronivuodetektorien toiminta tarkistetaan. Tämän jälkeen reaktorirakennuksen siirtojen valvoja ilmoittaa siirron suorituksesta valvomoon. Kuviossa 8 on esitetty yleiskuva polttoaineensiirtoon käytettävistä laitteista polttoaine- ja reaktorirakennuksessa edellä esitetyn siirtoprosessin ymmärtämisen tueksi. (Phase Commissioning Program for First Core Loading 2019.)



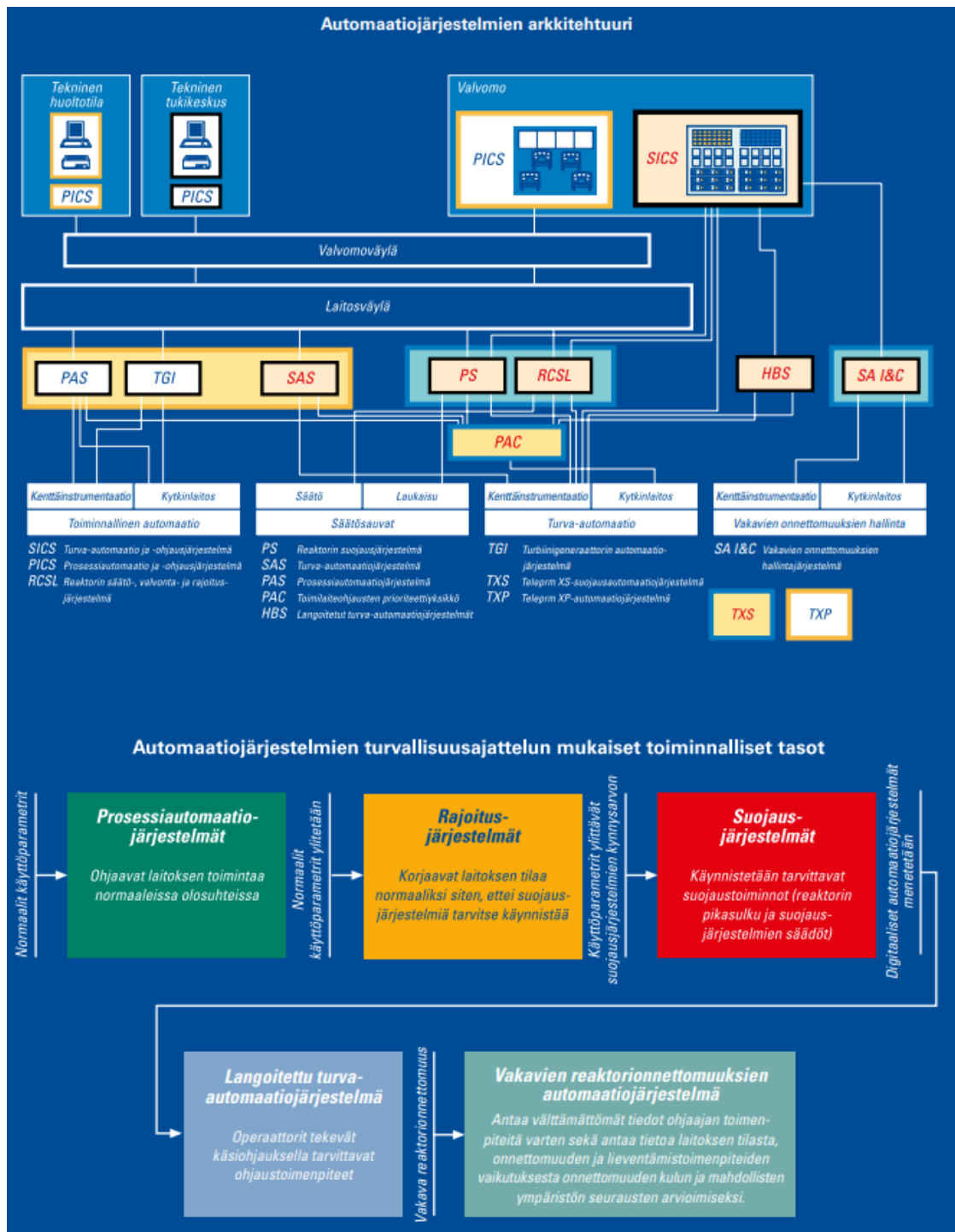
Kuvio 8. Yleiskuva polttoaineensiirtolaitteista. (Systemés de manutention et levage 2020, 6.)

Polttoainelatauksen aikana CCU:lta havaitaan myös polttoaine- ja reaktorialtaiden lämpötilat sekä pinnankorkeudet. CCU:lta nähdään myös lähdealueen neutronivuodetektorien pulssitaajuudet, joita käsitellään myöhemmässä vaiheessa tarkemmin. Päävalvomossa on vastaavanlainen CCU, josta käyttöorganisaatio pystyy seuraamaan siirtojen etenemistä reaaliaikaisesti puhelinyhteyden lisäksi. (Phase Commissioning Program for First Core Loading 2019.)

5.7 Automaatio

OL3:n automaatio ja siihen kuuluvat toiminnot ja laitteet noudattavat ydinturvallisuuden periaatteita. Automaatioarkkitehtuuri toimii syvyysuuntaisen turvallisuusajattelun mukaisesti. Turvallisuuden varmistamiseksi on viisi toiminnallista tasoa, jotka ovat havainnollistettu kuviossa 9. Prosessiautomaatiojärjestelmät pyrkivät pitämään laitoksen säätöparametrit normaalilla käyttöalueella. Rajoitustoiminnot pyrkivät palauttamaan laitoksen parametrit takaisin normaalille säätöalueelle, mikäli ne on ylitetty. Suojausjärjestelmät käynnistävät tarvittavat suojaustoiminnot laitoksella, jotta saavutetaan hallittu tila ja estetään käyttöhäiriöiden kehittyminen mahdolliseksi onnettomuudeksi. Laitos on varustettu myös muusta automaatiosta riippumattomalla langoitetulla turva-automaatiojärjestelmällä, mikäli digitaalinen automaatiojärjestelmä menetetään. Näiden lisäksi on muista automaatiojärjestelmistä riippumaton vakavien reaktorionnettomuuksien automaatiojärjestelmä, jonka avulla hallitaan laitoksen tilaa mahdollisessa vakavassa onnettomuudessa. (Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3 2014, 49.)

Automaatiojärjestelmät käsittävät kenttäinstrumentaation, ohjaus- ja säätöjärjestelmät sekä laitoksen ohjaukseen ja valvontaan tarvittavat käyttöliittymät. Laitoksen automaatioarkkitehtuuri (kuvio 9) on jaettu toiminnoittain kolmeen tasoon. Taso 0 on liityntä prosessiin, joka koostuu mittauksista ja ohjauksista. Taso 1 sisältää ohjaus- ja säätöpiirit, joiden tehtävänä on reaktorin valvonta- ja rajoitustoiminnot sekä suojaustoiminnot. Taso 2 sisältää käyttöliittymät, joilla tarkoitetaan päävalvomon, varaohjauspaikan ja teknisen tukikeskuksen ohjauspaneeleita. Lisäksi tasoon 2 kuuluvat valvomo- ja laitosväylä, jotka toimivat linkkinä käyttöliittymien ja järjestelmätason automatiikan välillä.



Kuvio 9. Automaatioarkkitehtuuri ja turvallisuusajattelun mukaiset toiminnalliset tasot. (Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3 2014).

6 Alikriittisyyteen vaikuttavat fysikaaliset tekijät

Reaktorin kriittisyyttä kuvataan kasvutekijällä k , mikä tarkoittaa uuden sukupolven neutronien lukumäärän suhdetta aikaisemman sukupolven neutronien määrään. (Kouhia & Kyrki-Rajamäki 2014, 45.) Kasvutekijä määrittelee neutronien keskimääräisen eliniän aikaisen neutronien suhteellisen määrän muutoksen. Kasvutekijän avulla on määriteltävissä reaktiivisuussuure ρ . Alikriittisyydellä tarkoitetaan tilaa, jossa ei tapahdu fissioissa vapautuvien neutronien ylläpitämää ketjureaktiota (Määritelmät 2021). Reaktori on alikriittinen tilanteessa, jossa peräkkäisissä sukupolvissa oleva neutronien lukumäärä on laskeva eli k_{eff} on pienempi kuin 1. Tällöin neutronien ja fissioiden lukumäärä vähenee neutronisukupolvesta toiseen kohti nollaa. (Kouhia & Kyrki-Rajamäki 2014, 45.)

Kasvutekijä:

- $k < 1$, reaktori on alikriittinen eli reaktoriteho laskee.
- $k = 1$, reaktori on kriittinen eli reaktoriteho pysyy vakiona.
- $k > 1$, reaktori on ylikriittinen eli reaktoriteho kasvaa.

Reaktiivisuus ρ on kasvutekijän rinnakkaissuure, joka määritellään efektiivisen kasvukertoimen avulla seuraavasti: $\rho = (k_{eff} - 1)/k_{eff}$. (Sandberg 2004, 32).

Reaktiivisuus:

- $\rho < 0$, reaktori on alikriittinen eli reaktoriteho laskee.
- $\rho = 0$, reaktori on kriittinen eli reaktoriteho pysyy vakiona.
- $\rho > 0$, reaktori on ylikriittinen eli reaktoriteho kasvaa.

Syvyysuuntaista turvallisuutta käsiteltäessä todettiin reaktorin suunnittelun olevan sellainen, että reaktorin tehon hallitsematon kasvu estetään luontaisilla takaisinkytkennöillä. Tässä luvussa käsitellään kaikki reaktiivisuuteen vaikuttavat tekijät sekä reaktorin alikriittisyyteen vaikuttavat tekijät polttoaineenvaihdossa.

6.1 Polttoaineen lämpötila

Polttoaineen lämpötilan muutos vaikuttaa reaktiivisuuteen. Polttoaineen lämpötilan noustessa U-238 resonanssialueen absorptiovaikutusalapiikit leviävät, jolloin neutroniabsorptio lisääntyy ja reaktiivisuus pienenee. Tästä tapahtumasta käytetään nimitystä Doppler-ilmiö. Reaktiivisuus pienenee sen vuoksi, että neutronien lisääntyvän absorptio vuoksi mahdollisten fissioiden aiheuttavien neutronien lukumäärä pienenee. Tästä syystä polttoaineen lämpötilasta johtuva reaktiivisuustakaisinkytkentä on negatiivinen. Polttoaineen lämpötilan vaikutus reaktiivisuuteen voidaan yhdistää hidastimen lämpötilan ja sydämen lämpötilajakauman kanssa, jolloin saadaan reaktorin tehon vaikutus reaktiivisuuteen. (Fuel Temperature Coefficient-Doppler Coefficient 2021; Sandberg 2004, 35-36.)

6.2 Jäähdytteen lämpötila

Jäähdytteen yhtenä tarkoituksena on hidastaa neutronit termiselle alueelle ja mahdollistaa neutronien fissio. Jäähdytteen lämpötilan nousun vaikutuksesta jäähdytteen tiheys pienenee, minkä vuoksi neutroneita jarruttavien vetymolekyylien määrä vähenee jäähdytteessä. Termisten neutronien määrän vähenemisen vuoksi reaktiivisuus pienenee vähenevien fissioiden vuoksi. Jäähdytteen lämpötilan nousun aiheuttama reaktiivisuustakaisinkytkentä on negatiivinen. (Moderator Temperature Coefficient 2021; Sandberg 2004, 36.) Jäähdytteen tiheyden lasku laskee myös booriatomien tiheyttä jäähdytteessä, mikä aiheuttaa reaktiivisuuden kasvun. Tämä reaktiivisuusvaikutus on kuitenkin jäähdytteen lämpötilasta johtuvaa reaktiivisuusvaikutusta pienempi. (Boron Coefficient 2021.)

6.3 Boorikonsentraatio

Laitoksella käytetään jäähdytteessä boorihappoa, jossa boori on liuenneessa muodossa veden joukossa. Boori absorboi tehokkaasti neutroneita, jonka vuoksi booripitoisuuden kasvu pienentää reaktiivisuutta. Booripitoisuuden kasvu lisää neutroneja absorboivien partikkeleiden määrää jäähdytteessä. Jäähdytteen booripitoisuuden

kasvun aiheuttama vaikutus reaktiivisuuteen on negatiivinen. Jäähdytteen booripitoisuuden muutos reaktiivisuuteen on hidas prosessi. (Boron Coefficient 2021; Sandberg 2004, 38.)

6.4 Reaktorimyrkyt

Reaktorimyrkkyjen vaikutus reaktiivisuuteen on negatiivinen. Ksenon luokitellaan reaktorimyrkyksi, joka absorboi tehokkaasti neutroneja. (Neutron Poisons-Reactor Poisoning 2021). Ksenonia syntyy sekä suoraan fissiossa että fissiossa syntyvän jodin isotooppi 135:n hajotessa. Ksenon poistuu prosessista beetahajoamisen sekä neutroniabsorption kautta. (Sandberg 2004, 36-37.)

Reaktorin tehotaso vaikuttaa ksenonin hajoamiseen neutroniabsorption kautta. Tasaisella tehoajolla sydämen ksenonpitoisuus on tasapainotilassa, jossa ksenonia syntyy ja poistuu samalla nopeudella. Reaktorin tehoa nostettaessa tai laskettaessa ksenonpitoisuus on hetkellisesti epätasapainossa vallitsevan tehotason kanssa, jolloin ksenonin vaikutus kompensoidaan muuttamalla jäähdytteen booripitoisuutta tai säätösauvojen asemaa reaktorisydämessä. (Equilibrium Xenon-Stationary Xenon Poisoning 2021; Sandberg 2004, 36.)

Samarium on toinen merkittävä reaktorimyrkky ksenonin rinnalla suuren absorptiovaikutusalansa vuoksi. U-235:n fissiotuotteiden hajoamisen kautta syntyy prometium-149:ää. Samarium-149:ää syntyy prometium-149 beetahajoamisen kautta. Samarium-149 on stabiili isotooppi, jonka vuoksi sitä jää reaktoriin sammutuksen jälkeen. Reaktorin ollessa käytössä pitoisuus pysyy vakiona. Samariumia poistuu kahdella tavalla. Tehoajolla sitä poistuu samariumin palaman kautta, johon vaikuttaa neutronivuo ja samariumin pitoisuus. Toinen poistumistapa on polttoaineenvaihdossa. Polttoaineenvaihdossa osa reaktorisydämen polttoainenipuista vaihdetaan ja korvataan tuoreilla polttoainenipuilla. Tämän vuoksi polttoainenippujen uudelleenjärjestelyjen ansiosta samarium pitoisuus laskee kokonaisuudessaan sydämessä. (Samarium-149 2021).

6.5 Palama

Palamalla kuvataan polttoaineella tuotettua energiaa polttoaineyksikköä kohden. Yksikkönä käytetään yleisesti megawattipäivää kilogrammaa kohden. Polttoaineen palama määrittelee polttoaineen kulumisen eli uraanipolttoaineesta otetun lämpöenergian määrän. Reaktiivisuus laskee jakson aikana palaman edetessä, kun polttoainetta kulutetaan. Palaman kasvun aiheuttama reaktiivisuuden lasku kompensoidaan jäähdytteen booripitoisuutta alentamalla. (Fuel Burnup 2021.)

6.6 Säätösauvat

Säätösauvojen asento vaikuttaa reaktiivisuuteen, koska säätösauvoissa on sisällä absorbaattorimateriaalia. Säätösauvojen asentoa muuttamalla saadaan aikaan nopeita reaktiivisuusmuutoksia. Säätösauvojen vaikutus reaktiivisuuteen riippuu polttoaineen rikastusasteesta ja palamasta. Tuoreissa polttoainepiipissa vaikutus on suurempi. Reaktiivisuus on sitä negatiivisempi mitä enemmän säätösauvat ovat sisällä sydämessä. Säätösauvojen aiheuttama reaktiivisuusmuutos saavuttaa suurimman arvonsa sydämen alimmalla kolmanneksella. (Reactor Power Control 2021; Sandberg 2004, 38.)

7 Alikriittisyyden valvonta

Alikriittisyyden valvontaa polttoainelatauksen aikana suoritetaan päävalvomossa olevien käyttöliittymien avulla valvomohenkilökunnan toimesta. Ohjeistuksien tarkoituksena on varmistaa henkilökunnan oikeanlainen toiminta tilanteen hallitsemiseksi normaalien tilanteiden lisäksi myös poikkeavissa tilanteissa. Tässä luvussa käsitellään tarkemmin näiden asioiden lisäksi alikriittisyyden valvontaan läheisesti liittyviä järjestelmiä sekä alikriittisyyden heikkenemisestä aiheutuvia rajoituksia ja seurauksia.

7.1 Prosessin valvonta

7.1.1 Käyttöliittymät

Käyttöliittymät välittävät informaatiota pääautomaatiojärjestelmien ja valvomohenkilökunnan välillä. Käyttöliittymiin tulevat prosessin ja järjestelmien hälytykset ja varoitukset. OL3:lla on kaksi käyttöliittymää. Pääkäyttöliittymä on nimeltään Process Information and Control System (PICS) ja varakäyttöliittymä on nimeltään Safety Information and Control System (SICS). Käyttöliittymien tekniikka poikkeaa toisistaan. PICS-järjestelmä on tietokonepohjainen ja SICS-järjestelmä perustuu konventionaaliseen tekniikkaan.

PICS-järjestelmä

PICS-järjestelmä on laitoksen pääkäyttöliittymä, jota käytetään laitoksen normaaliin valvontaan ja ohjaukseen kaikissa tilanteissa mukaan lukien polttoaineenvaihto. Konventionaaliseen tekniikkaan perustuvaa SICS-käyttöliittymää käytetään vain siinä tilanteessa, että PICS-järjestelmä on menetetty. SICS-järjestelmä on riippumaton PICS-järjestelmästä. Alikriittisyyden valvontaan käytettävät työasemat ovat päävalvomossa ja varavalvomossa. Alikriittisyyden valvontaa suoritetaan varavalvomosta ainoastaan siinä tilanteessa, että päävalvomo on jostakin syystä menetetty. (OL3-suunnitteluperusteet-automaatio 2018, 27-30.)

SICS-järjestelmä

SICS-järjestelmää käytetään, jos PICS-järjestelmä menetetään. Tietokonepohjaisen automaation menettäminen ja PICS-järjestelmän menettäminen ovat tällaisia tilanteita. SICS-järjestelmää voidaan käyttää laitoksen ohjaukseen ja valvontaan kahdesta neljään tuntia ohjeistuksen mukaisesti PICS-järjestelmän menetyksen yhteydessä. Tämän jälkeen laitos on ajettava alas SICS-järjestelmällä. Polttoainelatauksessa laitos on sammutettuna ja käyttötilassa polttoaineenvaihto. Polttoaineenvaihdossa täydellisessä digitaalisen automaation menetyksessä polttoaineenvaihto keskeytetään. SICS-

järjestelmä sisältää myös kiinteästi langoitettuja toimintoja, mikäli ohjelmoitava automaatio menetetään kokonaan. (OL3-suunnitteluperusteet-automaatio 2018, 29-30.)

7.1.2 Järjestelmät

Tilavuudensäätöjärjestelmä

Tilavuudensäätöjärjestelmä KBA on rajapinta korkeapaineisen primääripiirin ja matalapaineisten järjestelmien välillä. Primääripiirin jäähdytteen paine ja lämpötila laskeaan järjestelmässä matalapaineisille järjestelmille sopivaksi. Alikriittisyyden kannalta olennaisia KBA-järjestelmään yhteydessä olevia matalapaineisia järjestelmiä ovat jäähdytteen varastointijärjestelmä KBB ja lisävesi- ja boorijärjestelmä KBC. KBC-järjestelmästä voidaan syöttää primääripiiriin täyssuolanpoistettua vettä ottamalla täyssuolanpoistettua vettä KBB-järjestelmästä. Booripitoista vettä syötetään primääripiiriin KBC-järjestelmästä, jossa sitä on varastoituna kahdessa varastointitankissa. Primääripiirin jäähdytteestä erotetaan 7000 ppm boori KBC-järjestelmään KBF-järjestelmällä ja tarvittaessa tehdään uutta booria jauheesta lämpimään veteen sekoittamalla. Samassa käsittelyssä tuotetaan täyssuolanpoistettua vettä KBB-varastointitankkeihin. Primääripiirin tarvitaan lisävettä palaman sekä ksenonin vaikutusten kompensoimiseksi. Jäähdyte pumpataan primääripiiriin takaisin korkeapainepumppuilla. Järjestelmä osallistuu reaktiivisuuden hallintaan syöttämällä boori- ja lisävettä primääripiiriin, joten järjestelmä on merkityksellinen alikriittisyyden valvonnan kannalta. Järjestelmässä on myös neljä kappaletta boorikonsentraatio mittauksia, joiden tarkoituksena on booripitoisuuden laimenemisen estäminen. (System Description Chemical and Volume Control System 30JEW/30KBA/30KBD 2019.)

Boori- ja lisävesijärjestelmä

Boori- ja lisävesijärjestelmään KBC kuuluu booriliuoksen sekoitussäiliö sekä kaksi booriliuoksen varastosäiliötä. Lisäksi järjestelmään kuuluu kaksi booriliuoksen syöttöpumppua ja kaksi täyssuolanpoistetun veden syöttöpumppua. Näiden lisäksi on

pumppu, jolla pystytään siirtämään ja sekoittamaan booriliuoksen sekoitussäiliön vettä.

Sekoitussäiliössä valmistetaan pitoisuudeltaan 7000 ppm booriliuosta sekoittamalla täyssuolanpoistettua vettä ja boorijauhetta keskenään. Booriliuosta toimitetaan booriliuoksen varastotankkeihin sekä hätäboorausjärjestelmän JDH-varastosäiliöihin. Lisäksi primäärijäähdytteestä erotetaan 7000 ppm pitoista booriliuosta, joka johdetaan KBC-varastosäiliöihin. Täyssuolanpoistetulla vedellä laimennettua boorivettä toimitetaan sekoitussäiliöstä käytetyn polttoaineen altaisiin sekä hätäjäähdytysvesialtaaseen. Näissä haluttu boorikonsentraatio on 1550 ppm. Täyssuolanpoistettu vesi otetaan KBB varastosäiliöistä. Järjestelmä osallistuu reaktiivisuuden hallintaan vaikuttamalla primäärijäähdytteen boorikonsentraatioon. (System Description Reactor Boron and Water Make-up System 30KBC 2019.)

Hätäboorausjärjestelmä

Hätäboorausjärjestelmään JDH kuuluu kaksi booriliuossäiliötä sekä kolme toisistaan riippumatonta pumppua. Kaksi pumppausketjua syöttää 7000 ppm pitoista boorijäähdytettä tarvittaessa boorisäiliöistä primääripiiriin. Yksi pumpuista toimii varapumppuna, joka voidaan tarvittaessa liittää booriliuossäiliön lisäksi hätäjäähdytysvesialtaaseen ja KBA-järjestelmässä olevaan tilavuudensäätötankkiin. Hätäjäähdytysvesialtaaseen pumppu liitetään pumpun määräaikaikokeessa ja KBA-järjestelmän tilavuuden säätötankkiin ainoastaan primääripiirin painekokeessa riittävän korkean paineen aikaansaamiseksi. Järjestelmän pumppauslinjat ovat yhdistettävissä siten, että yhden pumpun käytössä on tarvittaessa koko varastoitu booriliuosmäärä. Hätäboorausjärjestelmä varmistaa reaktorin alikriittisyyden kaikissa lämpötiloissa ja paineissa ilman säätösauvoja onnettomuustilanteissa. (System Description Extra Borating System 30JDH 2019.)

Järjestelmä käynnistyy automaattisesti ATWS-signaalista, höyrystimien alhaisesta paineesta sekä korkeasta neutronivuosta lähdealueella. ATWS-signaalilla tarkoitetaan sitä, että reaktorin pikasulussa kaksi säätösauvaa ei ole alle 35 cm:n syvyydellä. Polt-

toaineenvaihdossa tämä hälytys ei ole mahdollinen, koska säätösauvakoneisto on irrotettu ja säätösauvat ovat polttoaineniippujen sisällä. Höyrystin on polttoaineenvaihdossa paineeton, joten järjestelmän käynnistyminen höyrystimen alhaisesta paineesta ei ole mahdollinen. Järjestelmän käynnistyminen korkeasta lähdealueen neutronivuosta on mahdollinen polttoaineenvaihdon aikana, mikäli lähdealueen neutronivuon arvo saavuttaa kiinteän HQNS2-arvon. Polttoaineenvaihdon aikana boorikoncentraatio on niin korkea, että tämä ei ole todennäköistä ilman lähdealueen neutronivuon mittauksen vikaantumista. Polttoaineenvaihdon jälkeisessä laitoksen ylösajossa hälytyksen aktivoituminen on mahdollista, kun primääripiirin booripitoisuutta laimennetaan. Boorin kiteytymisen estäminen on tärkeää alikriittisyyden varmistamisen kannalta. Boorin kiteytyminen riippuu lämpötilasta. Kiteytymislämpötila 7000 ppm booripitoisuudelle on noin 16 astetta, jonka vuoksi ilmastointijärjestelmillä pidetään riittävän korkea lämpötila kiteytymisen estämiseksi. (System Description Extra Borating System 30JDH 2019.)

Jälkilämmönpoistojärjestelmä

Jälkilämmönpoistojärjestelmä JNA koostuu neljästä toisistaan riippumattomasta jäähdytysketjusta. Kaikissa jäähdytysketjuissa on venttiileiden lisäksi pumppu ja lämmönvaihdin, jonka kautta jälkilämpöä siirretään mereen välijäähdytysjärjestelmän kautta. Jäähdytysketjut ottavat imueden primääripiirin kuumasta haarasta ja palauttavat primääripiirin kylmään haaraan. (System Description Safety Injection System, Residual Heat Removal System, In-Containment Refueling Storage Tank 30JNA-30JND-30JNG-30JNK.) Painevesilaitoksen toimintaperiaatetta käsittelevässä luvussa todettiin, että primääripiirissä pääkiertopumppujen avulla kiertävä jäähdyte lämpeenee reaktorisydämessä. Tämän vuoksi käytetään termejä kuuma- ja kylmähaara.

Järjestelmä otetaan normaalisti käyttöön alasajossa primääripiirin lämpötilan ollessa alle 120 astetta. Tätä ennen primääripiirin lämpö on siirretty höyrystimien kautta sekundääripiiriin. Laitoksen ollessa polttoaineenvaihtoseisokissa järjestelmä huolehtii primääripiirin lämpötilan pysymisestä sallitulla alueella. (System Description Safety Injection System, Residual Heat Removal System, In-Containment Refueling Storage Tank 30JNA-30JND-30JNG-30JNK.) TTKE:n mukaan primääripiirin lämpötila saa olla

polttoaineenvaihtoseisokissa korkeintaan 55 astetta. (Turvallisuustekniset käyttöehdot 2017). Kahdesta JNA-osajärjestelmästä on yhteys KBA:n kautta KBE-järjestelmään, joka puhdistaa primääripiirin jäähdytettä polttoaineenvaihtoseisokin aikana. (System Description Safety Injection System, Residual Heat Removal System, In-Containment Refueling Storage Tank 30JNA-30JND-30JNG-30JNK.)

Täyssuolanpoistetun veden jakelujärjestelmä

Täyssuolanpoistetun veden jakelujärjestelmän GHC tehtävänä on varastoida täyssuolanpoistettua vettä kahdessa 1600 m³ varastosäiliössä sekä toimittaa vettä reaktori- ja turpiinipuolen kuluttajille. Vettä käytetään useissa eri järjestelmissä täyttö-, tiiviste- ja lisävetenä. Järjestelmässä on kaksi pumppua, joista toinen toimii varapumpuna. Lisäksi on hätälisävesipumppu, joka syöttää vettä tarvittaessa turpiinipuolella olevaan syöttövesisäiliöön. Tällä pumpulla ei ole kuitenkaan vaikutusta alikriittisyyteen. (System Description, Demineralized Water Distribution System GHC 2017.)

Täyssuolanpoistettua vettä tarvitsevat kuluttajat ovat jäähdytteen käsittelyjärjestelmä KBF, jossa vettä tarvitaan täyttö- ja lisävetenä vesirengaspumpulle. Booriliuoksen valmistuksessa KBC-järjestelmässä veden lämmitys ja kaasunpoisto suoritetaan KBF-järjestelmässä, jonka jälkeen täyssuolanpoistettu vesi toimitetaan KBC-järjestelmään. Polttoainealtaiden jäähdytysjärjestelmä on merkittävä alikriittisyyden kannalta, jossa vettä käytetään altaiden lisävetenä. Polttoainealtaissa boorikonsentraatio on 1550 ppm, jonka vuoksi KBC-järjestelmän varastointitankkien 7000 ppm boorikonsentraatio laimennetaan 1550 ppm pitoisuuteen GHC-veden avulla. Vastavainlainen laimennus suoritetaan hätäjäähdytysvesiallasta täytettäessä. Näiden lisäksi GHC-vettä käytetään pääkiertopumppujen kolmannen tiivisteiden huuhteluvetenä sekä pumpun yhteydessä olevien tankkien täyttö- ja lisävetenä. Pääkiertopumppuja on yhteensä neljä kappaletta ja niiden tarkoituksena on kierrättää primääripiirin jäähdytettä reaktorista höyrystimien kautta takaisin reaktoriin. Polttoaineenvaihdossa pääkiertopumput ovat pysäytettynä. GHC-vettä käytetään täyttö- ja lisävetenä myös välijäähdytysjärjestelmässä KAA, jonka tarkoituksena on siirtää jälkilämpöä pois reaktorista JNA-järjestelmästä mereen PE-järjestelmän kautta. JNA-järjestelmän paine on alhaisempi verrattuna KAA-järjestelmän paineeseen, joten JNA-

järjestelmässä olevan booripitoisen veden laimenemisen riski on olemassa JNA-järjestelmän käydessä mahdollisessa lämmönvaihtimen vuototilanteessa. (System Description, Demineralized Water Distribution System GHC 2017.)

7.1.3 Alikriittisyyden heikkenemisestä aiheutuvat rajoitukset ja seuraukset

Alikriittisyyden heikkenemisestä indikoivia hälytyksiä oli kolme kappaletta, jotka käsitellään tässä alaluvussa. Syvyysuuntaisessa turvallisuusajattelussa erotettiin kolme tasoa, jotka olivat ennalta ehkäisevä, suojaava ja lieventävä taso. Alikriittisyyden heikkenemisestä indikoivat kolme hälytystä ovat suojaavan tason hälytyksiä. Hälytysten yhteydessä käytetään termiä permissiivi. Permissiivit ovat lupaehtoja tärkeille automaattisille toiminnoille laitoksella.

Hälytys JRY03 EY294X XM01 SRD FLUX AL

Korkeasta lähdealueen neutronivuosta aiheutuu hälytys JRY03 EY294X XM01, jonka kuvausteksti on SRD FLUX AL. Tämä hälytys aktivoi suojarakennuksen evakuoinnin, joten polttoaineenvaihto keskeytyy tilapäisesti. Hälytyksen mahdollisia aiheuttajia ovat hälytysohjeen mukaan primääripiirin laimeneminen tai vääränlainen polttoaine-elementtien järjestys. Suositeltavia toimenpiteitä ovat boorikonsentraation tarkastus, laimennuslähteiden eristyksen varmistus ja oikeanlaisen polttoainesiirtojen järjestyksen varmistaminen. Suojarakennuksen evakuointi -hälytys aktivoituu, kun permissiivi P8 on aktiivisena. Permissiivi P8 on tehoajon laimennuksen eston kytkentäraja, joka aktivoi alasajon laimennuksen eston ja estää tehoajon laimennuksen eston ollessaan aktiivisena. Tätä hälytystä kutsutaan HQNS1-hälytysrajaksi. Hälytyksen seurauksena voi olla JDH:n aktivoituminen, joka käsitellään seuraavan hälytyksen yhteydessä.

Hälytys JRY03 EY909 XD01 EBS ACTUATION AL

Alikriittisyyden heikkenemisestä aiheutuu hälytys JRY03 EY909X XD01, jonka kuvausteksti on EBS ACTUATION AL. Tämä hälytys kytkee päälle järjestelmissä aikaisemmin

käsitellyn hätäboorausjärjestelmän käynnistymisen, jonka tarkoitus on syöttää primääripiiriin noin 7000 ppm pitoista boorivettä. Hälytys aktivoituu suojausjärjestelmästä ja hälytyksestä siirrytään hätätilanneohjeeseen. Tämän hälytyksen ainoa mahdollinen aiheuttaja polttoaineenvaihdon aikana on korkea lähdealueen neutronivuo, kun permissiivit P2 ja P5 eivät ole aktivoituneena. Permissiivi P2 on tehoajon suojausien kytkentäraja, joka kytkee päälle SRD neutronivuon ollessaan poissa päältä. Permissiivi P5 on SRD suojausien kytkentäraja, joka kytkee päälle JDH:n korkeasta SRD:n neutronivuosta ollessaan poissa päältä. Permissiivien P2 ja P5 täytyy molempien olla pois päältä, jotta SRD on toimintakuntoinen. Tätä hälytystä kutsutaan hälytysrajaksi HQNS2.

Hälytys JRY03 EY904X XD01

Alikriittisyyden heikkenemisestä aiheutuu hälytys JRY03 EY904X XD01, jonka kuvausteksti on CVCS ISOL AL. Tämä hälytys eristää KBA-järjestelmän yhteydessä käsitellyn VCT-tankin ja kääntää imueden saannin automaattisesti hätäjähdytysjärjestelmän altaaseen. Hätäjähdytysvesialtaassa on 1550 ppm pitoista boorivettä. Hälytys aktivoituu suojausjärjestelmän kautta. Hälytyksen aiheuttaja on alhainen boorikonsentraatio KBA-järjestelmän sisäänsyöttölinjassa polttoaineenvaihto-ohjeen aikana. RCSL-järjestelmän booraustoiminto saattaa olla myös vikaantunut. Suositeltavia toimenpiteitä ovat booripitoisuuden arvon tarkistaminen KBA-järjestelmän paluulinjassa primääripiiriin. Hälytyksestä siirrytään häiriöohjeeseen, mikäli permissiivi P8 ei ole aktivoitu. Permissiivi P8 aktivoituu automaattisesti, kun säätösauvat ovat ala-asennossa. Hälytyksestä siirrytään hätätilanneohjeeseen, mikäli permissiivi P8 on aktivoitu. Permissiivi P8 on tehoajon laimennuksen eston kytkentäraja. Hälytys aiheuttaa polttoaineenvaihdon keskeytymisen.

7.2 Instrumentointi

Reaktorisydämen instrumentointi jaetaan sydämen sisäiseen instrumentointiin ja sydämen ulkopuoliseen instrumentointiin. Sydämen ulkopuolinen instrumentointi JKT koostuu kolmen eri mittausalueen antureista, joista lähdealueen antureita käytetään

polttoainelatauksessa. (Excore Neutron Flux Instrumentation System-System Description D-02.1 2018).

Instrumentointiin kuuluva booripitoisuuden tarkkailu on olennainen osa alikriittisyyden valvontaa. Booripitoisuutta tarkkaillaan ydinteknisen näytteenottojärjestelmän KUA avulla ja KBA-järjestelmässä olevien boorimittausten avulla.

7.2.1 Boorikonsentraatio

Tilavuudensäätöjärjestelmä KBA

KBA-järjestelmässä on booripitoisuuden mittaus, jolla valvotaan primääripiiriin syötettävän veden booripitoisuutta polttoaineenvaihdossa. (OL3-suunnitteluperusteet-automaatio 2018, 34.) Valvonnan tarkoituksena on estää booripitoisuuden laimenneminen primääripiirissä, joka vaikuttaa reaktiivisuuteen ja polttoaineenvaihdon aikana alikriittisyyteen. KBA-järjestelmän boorikonsentraatio on yleisesti sama primääripiirin boorikonsentraation kanssa polttoaineenvaihdossa, koska järjestelmä on yhteydessä primääripiiriin ja prosessissa tapahtuvat muutokset minimaalisia. Primääripiiriin täytössä huomioitavaa on, että veden boorikonsentraation on oltava vähintään sama kuin primääripiirissä oleva boorikonsentraatio. Tämä booripitoisuuden arvo asetellaan manuaalisesti PICS-järjestelmään, jolloin inhimillisen virheen mahdollisuus on olemassa. (Täyssuolanpoistetun veden käyttö boorivettä sisältävissä järjestelmissä 2021, 4.) Primääripiirin laimennemisen ehkäisemiseksi on asetettu boorikonsentraatiorajat, joita käsiteltiin alikriittisyyden heikkenemisestä aiheutuvia rajoituksia ja seurouksia käsittelevässä alaluvussa. Primääripiirin laimennemisessä neutroneita absorboivien partikkeleiden määrä vähenee ja alikriittisyys heikkenee.

Boorikonsentraation laskenta suoritetaan reaktorin suojausjärjestelmässä PS, vaikka mittauksia käytetään myös reaktorin säätö-, valvonta- ja rajoitusjärjestelmässä RCSL ja reaktorin turva-automaatiojärjestelmässä SAS. Mittaustiedon toimittamiseen käytetään PS-järjestelmää. (OL3-suunnitteluperusteet-automaatio 2018, 34.)

Ydintekninen näytteenottojärjestelmä KUA

Painevesilaitoksen toimintaperiaatetta käsittelevästä luvusta kävi ilmi, että primääripiirin jäähdytteen olomuoto on neste johtuen primääripiirin korkeasta paineesta. Booripitoisuuden valvontaa tarkkaillaan ydinteknisen näytteenottojärjestelmän avulla, joka ottaa nestemäisiä näytteitä primääripiiristä, jälkilämmönpoistojärjestelmästä ja ydinteknisistä apujärjestelmistä. Primääripiirin näytteet voidaan ottaa kolmesta eri kohdasta. Ydinteknisten apujärjestelmien näytteet voidaan ottaa KBA-järjestelmässä ennen jäähdytteen puhdistusta tai järjestelmän korkeapainepumppujen jälkeen ennen syöttöä takaisin primääripiiriin. Jälkilämmönpoistojärjestelmän näytteet otetaan lämmönvaihtimen jälkeen, jotta havaitaan tahaton booripitoisuuden laimeneminen mahdollisessa lämmönvaihtimen vuototilanteessa. Polttoaineenvaihtoseisokissa mahdollisessa vuototilanteessa välijäähdytysjärjestelmän täyssuolanpoistettu vesi vuotaisi jälkilämmönpoistojärjestelmään johtuen välijäähdytysjärjestelmän korkeammasta paineesta.

Boorimittaus KUA61 CQ001/002 perustuu neutronien absorboitumiseen B10:een, joka riippuu jäähdytteen booripitoisuudesta sekä B10 suhteesta kokonaisboorissa. Boorimittauksen tuloksena saadaan kokonaisboorikonsentraatio ja B10-pitoisuus. B10-pitoisuus tarkoittaa primääripiirin B10-väkevöinnin osuutta atomiprosentteina.

Primäärijäähdytteen näytteenotto polttoaineenvaihdossa varmistetaan osajärjestelmien fyysisellä erottelulla. Lisäksi on mahdollista ottaa käsinäytteet jatkuvatoimisten boorimittausten vikaantuessa. Näytteenoton sähkönsyöttö on varmistettu hätäsähköllä luotettavan mittaustiedon saamiseksi kaikissa tilanteissa.

7.2.2 Neutronivuomittaus

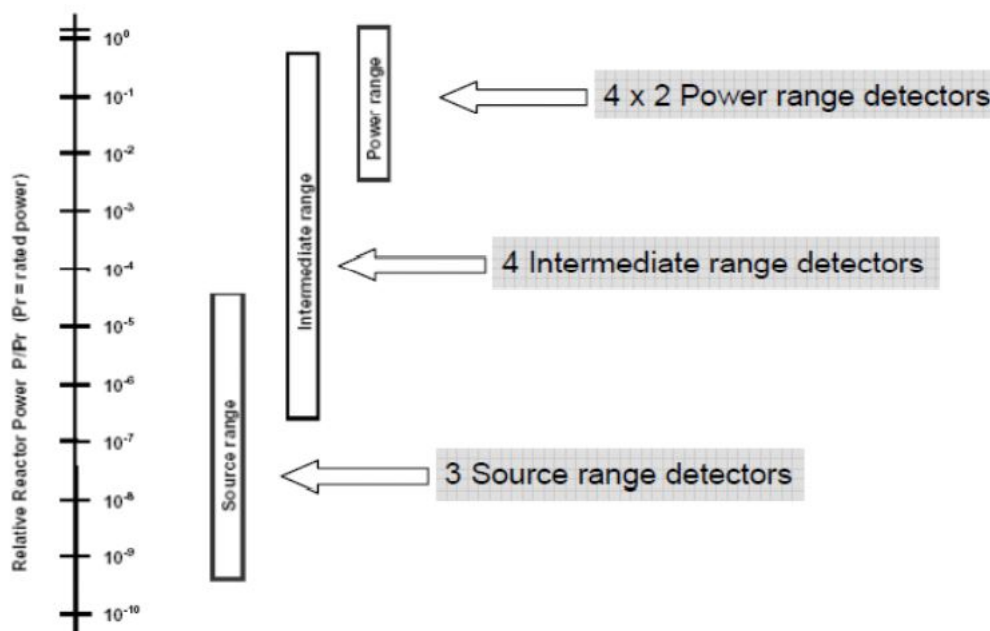
Reaktorin ulkopuolisen neutronivuomittausjärjestelmän tarkoituksena on tuottaa mittaustietoa reaktorin kokonaistehosta ja sen muutoksista kaikissa tilanteissa. Polttoainelatauksen aikana reaktorin ollessa sammutettuna ulkopuolinen neutronivuojärjestelmä tuottaa tarkkoja mittaustuloksia ladatusta sydäimestä. Tämä varmentaa osaltaan sitä, että lataus vastaa ennalta suunniteltua lataussuunnitelmaa.

Neutronivuota mitataan kolmella erilaisella anturityypillä, jotka ovat lähdealueen, välialueen ja tehoalueen anturit. Kaikilla anturityypeillä on oma mittausalueensa. Taulukosta 2 havaitaan jokaisen anturin mittausalue ja mittaussignaali. Polttoainelatauksessa käytetään lähdealueen antureita ja polttoainelatauksen jälkeisessä ylösajossa saavutetaan väli- ja tehoalueen antureiden mittausalue. (OL3-suunnitteluperusteet-automaatio 2018, 31; Excore Neutron Flux Instrumentation System-System Description D-02.1 2018).

Taulukko 2. Neutronivuomittauksen anturityypit ja mittausalueet. (OL3-suunnitteluperusteet-automaatio 2018).

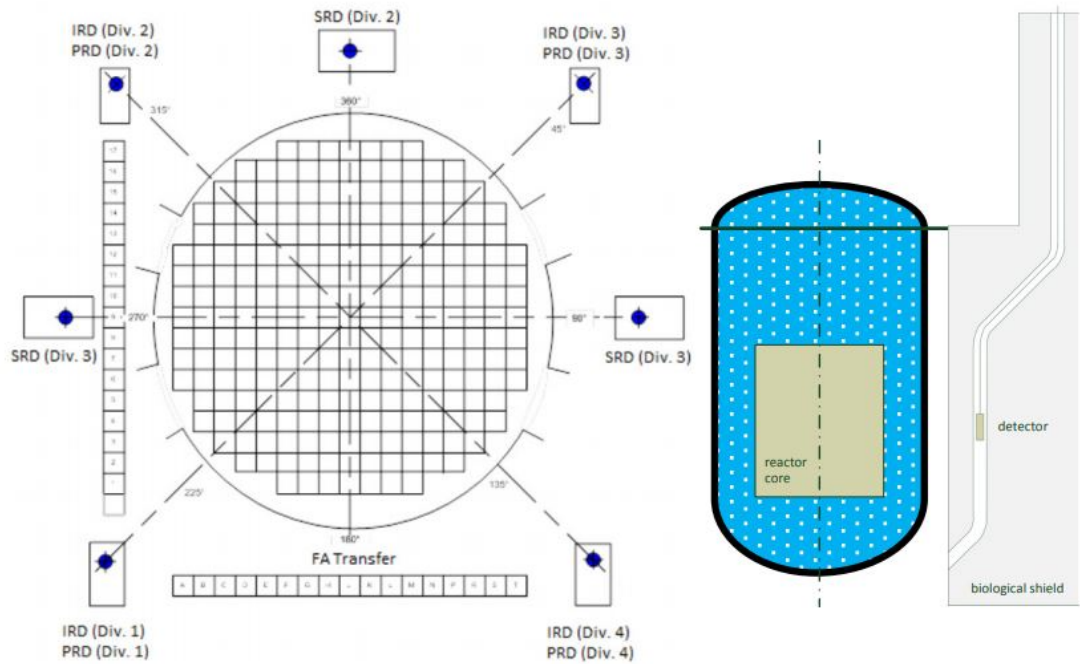
Anturi	Mittausalue	Mittaussignaali
Lähdealueen anturi	$5 \times 10^{-2} \text{ n/cm}^2\text{s} - 5 \times 10^{+4} \text{ n/cm}^2\text{s}$.	Pulssi
Välialueen anturi	$5 \times 10^{-6} \% - 60\%$ reaktorin nimellistehosta	Analoginen
Tehoalueen anturi	$0.5 \% - 200\%$ reaktorin nimellistehosta	Analoginen

Kuviosta 10 havaitaan lähde-, väli- ja tehoalueen neutronivuoantureiden mittausalueet vertikaalisessa suunnassa sekä mittausalueiden päällekkäisyydet varmistamaan luotettavan mittaustiedon saanti kaikissa tilanteissa. Polttoainelatauksessa ja sen jälkeisessä ylösajossa neutronivuo pystytään varmistamaan luotettavasti, koska mittausalueet toimivat limittäin luotettavan mittaustiedon saamiseksi. Permissiivin P5 aktivointi kytkee lähdealueen neutronivuon pois päältä ja ottaa käyttöön välialueen neutronivuon mittauksen.



Kuvio 10. Ulkopuolisten neutronivuoantureiden mittausalueet. (Excore Neutron Flux Instrumentation System-System Description D-02.1 2018,16).

Kuviosta 11 havaitaan, että anturit sijaitsevat betonirakenteen sisällä olevassa kanavassa reaktorin ulkopuolella. Lähdealueen anturit on sijoitettu omiin erillisiin kanaviin ja väli- ja tehoalueen anturit ovat yhteisessä kanavassa. Kuviosta 11 havaitaan myös, että lähdealueen antureita on vain kolme kappaletta. Lähdealueen antureista käytetään kirjainlyhennettä SRD (Source Range Detector). TTKE:n mukaan polttoainelataus ei ole sallittua, mikäli yksikin lähdealueen anturi on vikaantunut tai huollossa. Polttoaineen poistaminen reaktorista on kuitenkin sallittua TTKE:n mukaan. Polttoainelatauksessa käytetään lähdealueen antureita, jotka ovat herkempiä pienillä tehoalueilla. Lähdealueen anturi mittaa pulsseja johtuen signaalin heikkoudesta. Väli- ja tehoalueen anturit mittaavat virtaa, koska pulsseja tulee tiheästi. Reaktorin ulkopuolisten neutronivuomittausjärjestelmän antureita käytetään reaktorin suojausjärjestelmän suojaustoiminnoissa. Lisäksi mittauksia hyödynnetään myös muissa automaatiojärjestelmissä sekä reaktiivisuuden määrittämiseen laitoksen käynnistyksessä. (OL3-suunnitteluperusteet-automaatio 2018, 31-32; Excore Neutron Flux Instrumentation System-System Description D-02.1 2018).



Kuvio 11. Antureiden sijainti. (Excove Flux Instrumentation JKT-Equipment Operation and Maintenance Manual D-05.1 2019, 15).

Vuosihuollon jälkeisessä ylösajossa ennen ydinlämmityksen alkamista suoritettavilla pientehokokeilla varmistetaan reaktorisydämen oikeanlaisesta käyttäytymisestä pienellä teholla. Määräaikaiskokeen JKT-180-2 tarkoituksena on todentaa ulkoisten neutronivuoantureiden toimintakuntoisuus. Kokeessa varmistetaan SRD- ja IRD- sekä IRD- ja PRD-mittausalueiden välinen riittävä päällekkäisyys sekä signaalien lineaarinen riippuvuus toisistaan mittausalueiden päällekkäisyysalueilla. Kokeessa tarkistetaan myös SRD:n ja IRD:n välisen rajan määrittävän permissiivin P5 asetusarvon oikeellisuus sekä korkean SRD-neutronivuon suojausrajan HQNS2 oikeellisuus. TTKE määrittelee IRD neutronivuon suojausrajan laskemisen 2,5 %:iin ja rajoitusrajan 2 %:iin koetta tehtäessä. Koetta tehtäessä käytetään myöhemmin käsiteltäviä HU-työkaluja, koska koetta suoritettaessa ollaan tekemisissä reaktiivisuusmuutosten kanssa. (Pientehokokeiden suorittaminen 2019, 5-7, 11-14.)

7.3 Ohjeistus

7.3.1 Normaali käyttö

Ydinvoimalaitoksella käytetään ohjeita, joilla varmistetaan laitoksen turvallinen ja taloudellinen käyttö kaikissa tilanteissa. OL3:lla ohjeet ovat jaettu käyttökäsikirjan mukaan normaalikäyttöön ja häiriötilanteisiin, hätätilanteisiin, toimenpideohjeisiin, järjestelmäkohtaisiin käyttöohjeisiin, hälytysohjeisiin ja kytkinlaitokset. (Käyttökäsikirja 2020.)

Polttoainelatauksen aikana käytetään normaalikäyttöön luokiteltua Refueling Operation -vuokaavio-ohjetta. Vuokaavio-ohjeeseen on sisällytetty myös lukuisia toimenpideohjeita toimenpiteiden oikeanlaisen suorituksen turvaamiseksi. Vuokaavio-ohje pitää sisällään ennen konkreettista polttoaineen purkua suoritettavat valmistelut, joihin luokitellaan sisäiseen instrumentointiin ja säätösauvojen ohjaukseen liittyvien kaapelien irrotus ennen reaktorikannen avaamista. Tämän jälkeen reaktorialtaan pinnan nostamista jatketaan samanaikaisesti kannen nostamisen kanssa. Polttoainelatauksen jälkeen suoritettavat tehtävät ennen laitoksen ylösajon aloittamista ovat reaktorialtaan pinnan lasku, reaktorikannen sulkeminen ja sisäiseen instrumentointiin ja säätösauvojen ohjaukseen liittyvien kaapelien kytkentä. Vuokaavio-ohjeeseen on sisällytetty myös lukuisia määräaikaiskokeita, joita tehdään ennen polttoaineen purkua ja polttoainelatauksen jälkeen ennen laitoksen ylösajon aloittamista. Tämän lisäksi tehdään mahdollisesti muiden kuten kunnossapito-organisaation suorittamia määräaikaiskokeita.

Alikriittisyyden kannalta on tärkeää varmistua ohjeessa tapahtuvista käyttötilojen muutoksien edellytysten täyttymisestä. Käyttötilojen vaihtuessa on vaatimuksia esimerkiksi booripitoisuudelle. Vuokaavio-ohjeessa eristetään mahdollisia laimennuslähteitä ennen konkreettisen polttoaineenvaihdon alkamista. Polttoaineenvaihdon aikana on pidettävä käynnissä järjestelmiä, joiden kautta laimeneminen on mahdollista. Tällaisia järjestelmiä ovat tilavuudensäätöjärjestelmä, polttoainealtaan puhdistus- ja jäähdytysjärjestelmät sekä jälkilämmönpoistojärjestelmä.

7.3.2 Häiriötilanne

Hälytykset nähdään normaalikäytöllä PICS-käyttöliittymän hälytysnäytöltä. Häiriötilanteessa siirrytään hälytysohjeisiin, jotka antavat tukea hälytyksen syyn selvittämisessä. Hälytykset ovat jaettu kirjaintunnuksella eri luokkiin. Luokat H, A, W, T, M ja O ovat tarkoitettu valvomohenkilöstölle antamaan tietoa prosessista ja järjestelmästä.

H-luokan hälytyksillä on korkein prioriteettiluokka, jonka jälkeen hallitun tilan saavuttamiseen vaaditaan toimenpiteitä. A-luokan hälytykset ovat tarkoitettu merkittävillä vikatilanteille, jotka ilmoittavat suojaustoiminnon aktivoitumisesta. W-luokan hälytykset ovat varoituksia, jotka ilmoittavat mahdollisesta suojaustoiminnon aktivoitumisesta. T-luokan hälytykset ovat alhaisen prioriteetin ilmoituksia. Hälytys ilmoittaa häiriöstä, joka ei liity turvallisuusjärjestelmiin. M-luokan hälytyksiä ovat ilmoitukset automaatio- ja prosessilaitteistoa koskevista huolto- ja kunnossapitotoimenpiteistä. O-luokan hälytys on käyttäjälle osoitettu kuittauspyyntö. F-luokan hälytykset ilmoittavat häiriöstä automaatiotoiminnoissa, kuten automaatiojärjestelmän laitehäiriöstä. (TXP OM690 for OL3 User Manual 2009.)

Alikriittisyyden valvonnan kannalta merkittävät hälytykset ovat A-luokan hälytyksiä, joka tarkoittaa suojaustoiminnon aktivoitumista. Hälytykset käsiteltiin aikaisemmin alikriittisyyden heikkenemisestä aiheutuvia rajoituksia ja seurauksia luvussa. Hälytys JRY03 EY909X XD01 käynnistää JDH-järjestelmän, joka aktivoi H-hälytyksen. H-hälytyksellä on korkein prioriteetti, jonka jälkeen siirrytään hätätilanneohjeeseen. Hälytyksestä JRY03 EY904X XD01 siirrytään myös hätätilanneohjeeseen, kun permissiivi P8 on aktiivinen. Hätätilanneohjeistus käsitellään seuraavassa alaluvussa.

7.3.3 Hätätilanne

Hätätilanteisiin voidaan siirtyä normaalikäytöltä suoraan H-tasaisen hälytyksen tultua, hälytysohjeen ohjaamana tai häiriöohjeen kautta. Polttoainenvaihdossa reaktoripaineastian kansi on auki, jonka vuoksi hätätilanteessa siirrytään Main Strategy to Prevent Core Melt -vuokaavio-ohjeeseen. Pääohjeesta siirrytään aliohjeeseen Restore Subcriticality, mikäli neutronivuo on suurempi kuin 1000 pulssia sekunnissa. Neutronivuon arvo nähdään PICS-käyttöliittymältä SRD-mittauksilta kaikilta neljältä

divisioonalta. Neutronivuota mitataan ainoastaan SRD-detektoreilla polttoaineenvaihdossa. Restore Subcriticality -ohjeella pyritään palauttamaan turvalliset olosuhteet laitokselle alikriittisyyden suhteen. Ohjeessa pyritään palauttamaan boorikoncentraatio takaisin oikeaan arvoonsa käynnistämällä kaksi JDH-järjestelmää, mikäli ne eivät ole jo käynnissä. Nämä järjestelmät syöttävät 7000 ppm booripitoisuutta primääripiiriin. Neutronivuon ollessa yli 1000 pulssia sekunnissa, syötetään 1550 ppm pitoista boorivettä primääripiiriin JNG- tai JND- järjestelmillä ottamalla boorivettä hätäjäähdytysvesialtaasta. Jälkilämmönpoistossa olevia JNG-järjestelmiä ei voida käyttää tähän tarkoitukseen, koska ne poistavat jälkilämpöä reaktorista mereen. Aliohjeesta siirrytään takaisin pääohjeeseen, kun alikriittisyys on saatu varmistettua ja ohjeen kriteerit täytettyä. Pääohjeesta siirrytään takaisin Refueling Operation ohjeeseen käyttölinjan päätöksellä, kun kaikki aliohjeet ovat suljettu.

7.3.4 HU-työkalut

TVO-konsernin HU-työkaluilla pyritään estämään inhimilliset virheet ja niiden seuraukset, vaikka ydinvoimalaitos on suunniteltu kestämään yksittäinen inhimillinen virhe. Näiden menetelmien tarkoituksena on parantaa työturvallisuutta ja edistää laitosten turvallista ja luotettavaa käyttöä. Yrityksen HU-menetelmiä ovat aloituskokous, parityöskentely, riippumaton varmennus, varmennettu kommunikaatio ja lopetuskokous. (Menettelytapaohje onnistuneen työsuorituksen edellytyksistä 2019, 3-5.) Yrityksessä noudatetaan myös PATA-periaatetta, joka tulee sanoista pysähdy, ajattele, toimi ja arvioi. Pysähtymisen tarkoituksena on keskittyä ja kiinnittää huomiota meneillä olevaan työhön. Ajattelemisen tarkoituksena on aidosti pohtia työsuoritusta ja käytettävää työtapaa. Toimimisen tarkoituksena on suorittaa työ laadukkaasti. Arvioinnin tarkoituksena on analysoida tehtyä työsuoritusta ja viestiä tarvittaessa havainnoista eteenpäin.

Aloituskokouksen tarkoituksena on varmistaa, että kaikki työhön osallistuvat henkilöt ymmärtävät kokonaisuuden. Aloituskokouksessa varmistetaan lisäksi, että edellytykset työn aloittamiseen ovat olemassa. Edellytyksillä tarkoitetaan, että osaaminen,

työkalut, työlupa ja ohjeistus ovat kunnossa työn tekemiselle. Lisäksi aloituskokouksessa varmistetaan, että riskit ovat huomioitu ja aiemmista kokemuksista on otettu oppia. (Menettelytapaohje onnistuneen työsuorituksen edellytyksistä 2019, 5-7.)

Parityöskentelyllä tarkoitetaan työskentelytapaa, jossa toinen henkilö tekee työn ja toinen varmistaa. Parityöskentelyä käytetään, kun työllä on välitön prosessivaikutus. Parityöskentelyn tarkoituksena on ennaltaehkäistä virheiden syntymistä. Parityöskentelyä käytetään myös tilanteissa, kun henkilö tekee työn ensimmäistä kertaa. (Menettelytapaohje onnistuneen työsuorituksen edellytyksistä 2019, 8.)

Riippumatonta varmennusta käytetään, kun työllä ei ole välitöntä prosessivaikutusta. Sen tarkoituksena on havaita mahdolliset virheet heti työvaiheen jälkeen. Riippumaton varmennus tehdään riippumattoman henkilön tai eri organisaation toimesta. Toimintakoe on osa riippumatonta varmennusta, joka suoritetaan määräaikaikokeen yhteydessä. (Menettelytapaohje onnistuneen työsuorituksen edellytyksistä 2019, 9.)

Varmennetulla kommunikaatiolla varmistetaan viestin tarkka ymmärtäminen. Tarkoituksena on myös varmistaa, että toinen henkilö kuuntelee. Viestissä asia kerrotaan selkeästi, jonka vastaanottaja toistaa. Lopuksi vielä vahvistetaan viesti, jonka jälkeen työtä voidaan jatkaa. Varmennetun kommunikaation tarkoituksena on estää väärinkäsitysten syntymistä. (Menettelytapaohje onnistuneen työsuorituksen edellytyksistä 2019, 9.)

Lopetuskokouksessa kerätään yhteen kokemukset kaikilta työhön osallistuneilta henkilöiltä. Lopetuskokouksen tarkoituksena on kartoittaa alkuperäisen suunnitelman toimivuus sekä positiiviset ja kehitettävät asiat työtä suoritettaessa. Lopetuskokouksessa esille tulevia kehittämistoimenpiteitä on tarkoitus hyödyntää tulevaisuutta varten. (Menettelytapaohje onnistuneen työsuorituksen edellytyksistä 2019, 12.)

8 Kehittämistyön toteutus

Kehittämistyö toteutettiin prosessina. Kehittämistyön taustat, tavoitteet ja aiheen raja-
saus selvitettiin suunnitteluvaiheessa. Tämän jälkeen määriteltiin työn lähestymis-
tapa ja tutkimusmenetelmät, jonka jälkeen luotiin tietoperusta kehittämistyölle.

Tämän luvun alaluvuissa käydään läpi työn toteutusvaihetta sekä käsitellään teemoit-
tain löydökset dokumenttianalyysin, havainnoinnin ja haastattelun osalta. Haastat-
telu toteutettiin asiantuntijahaastatteluna. Haastattelun tarkoituksena oli syventää
dokumenttianalyysin ja havainnoinnin kautta saatua tietoa ilmiöstä. Haastattelulla
pyrittiin lisäämään syvällisyyttä ja luotettavuutta tutkittavasta asiasta.

8.1 Kehittämistyön toteutusmenetelmät

Alikriittisyyteen vaikuttavien tekijöiden tarkastelu suoritettiin dokumenttianalyysin,
havainnoinnin ja haastattelun avulla. Dokumenttianalyysin avulla kartoitettiin luotet-
tavasti alikriittisyyteen vaikuttavat tekijät polttoaineenvaihdossa. Haastattelulla tar-
kennettiin alikriittisyyteen vaikuttavia tekijöitä polttoaineenvaihdon aikana sekä sy-
vennettiin ymmärtämistä tutkittavasta ilmiöstä. Havainnoinnilla lisättiin luotetta-
vuutta ja selvitettiin mahdollisia poikkeavuuksia dokumenttianalyysin ja haastattelun
avulla saatuun tietoon.

Dokumenttianalyysi

Dokumenttianalyysin avulla käsiteltiin reaktiivisuustakaisinkytkentöjen vaikutukset
alikriittisyyteen polttoaineenvaihdossa. Tarkastelua suoritettiin analysoimalla reaktii-
visuuteen vaikuttavia tekijöitä sekä analysoimalla ilmiötä erityisesti polttoaineenvaih-
don näkökulmasta. Dokumenttianalyysi toteutettiin analysoimalla järjestelmällisesti
dokumentteja alikriittisyyteen liittyen sekä laitoksella käytössä olevien järjestelmien
toimintaan polttoaineenvaihdossa. Laitoksen toiminnan ja käytössä olevien järjestel-
mien analysointi oli olennainen osa dokumenttianalyysiä. Tarkastelussa käytettiin
suurimmaksi osaksi Kronodoc-nimistä tietokantaa, jossa on suuri määrä suojattuja

englanninkielisiä dokumentteja liittyen OL3-laitokseen. Tietokannasta hyödynnettiin lukuisia dokumentteja dokumenttianalyysin eri vaiheissa.

Dokumenttianalyysin avulla tehtiin johtopäätöksiä ja muodostettiin selkeä käsitys alikriittisyyteen vaikuttavista tekijöistä polttoaineenvaihdossa. Monipuolisen analysointiprosessin aikana muodostettiin synteesejä toiminnassa olevien järjestelmien vaikutuksesta alikriittisyyteen polttoaineenvaihdossa. Analyysitapana käytettiin sisällönanalyysiä, jossa tarkoituksena oli ymmärtää tekstin sisältöä ja merkitystä. Dokumentit olivat pääsääntöisesti englanninkielisiä, millä ei kuitenkaan koettu olevan merkittävää vaikutusta analysointiprosessin suorittamiseen. Sisällönanalyysi toteutettiin aineistolähtöisenä käsittelemällä ensin alikriittisyyteen vaikuttavia tekijöitä reaktorin takaisinkytkentöjen avulla, jonka jälkeen aloitettiin tutkimusaineiston pelkistäminen. Vilkan (2005, 140) mukaan pelkistämisen prosessin aikana suurimpana haasteena on olennaisen informaation katoaminen, jonka ehkäisemiseksi kehittämistyön tiivistämisen prosessia ohjasivat vahvasti tutkimuskysymykset.

Aineiston käsittely perustui päättelyyn ja tulkintaan. Tiivistämisen osatuloksista muodostettiin synteesejä. Näiden avulla koottiin yhteen keskeiset tulokset ja johtopäätösten perusteella saatiin vastauksia asetettuihin tutkimuskysymyksiin. Tiivistämisen aikana omia ajatuksia testattiin myös alkuperäiseen aineistoon, jolla haluttiin varmistaa olennaisen tiedon mukana pysyminen. Sisällönanalyysiä on kritisoitu menetelmänä johtopäätösten puuttumisten vuoksi, jonka vuoksi tässä kehittämistyössä muodostettiin johtopäätöksiä perusteluineen.

Havainnointi

Polttoaineensiirtoprosessi kesti yhteensä lähes viisi vuorokautta ympärivuorokautisesti suoritettuna, jonka jälkeen suoritettiin sydämen lopputarkastus. Havainnointia suoritettiin päävalvomossa sekä tarkkailemalla konkreettisesti polttoaineensiirtoprosessia suoja- ja polttoainerakennuksessa. Havainnointia suoritettiin jokaisen vuorokauden aikana mahdollisuuksien mukaan, minkä vuoksi kokonaiskuva polttoainelatauksesta muodostui hyväksi. Latauksen valvojen päiväkirjaa hyödynnettiin alikriitti-

syyteen vaikuttavien tekijöiden havaitsemiseksi, koska jatkuva havainnointi vuorokauden kaikkina aikoina ei ollut mahdollista. Havainnointimenettely osoittautui hyväksi, koska polttoainelataus muodostui rutiininomaiseksi lukuun ottamatta satunnaisia häiriöitä laitteistoissa. Sydämen lopputarkastukseen osallistuminen lisäsi havainnoinnin luotettavuutta merkittävästi alikriittisyyden varmistamisen suhteen. Sydämen lopputarkastuksessa olivat mukana IAEA, Euratom ja STUK.

Haastattelu

Asiantuntijan haastattelu toteutettiin polttoainelatauksen jälkeisellä viikolla Teams-sovelluksen avulla. Haastattelulla syvennettiin dokumenttianalyysin ja havainnoinnin kautta saatua tietoa. Teemahaastattelun tulokset käsiteltiin anonyyminä. Ojasalon ym. (2014, 55) mukaan kehitettävän ilmiön asiantuntijat voivat kuvata ja selittää ilmiötä tarkemmin. Tässä kehittämistyössä haastattelulla varmistettiin dokumenttianalyysin kautta muodostettujen tulkintojen ja johtopäätösten oikeellisuutta. Sisälönanalyysiä on kritisoitu menetelmänä johtopäätösten puuttumisten vuoksi, minkä vuoksi haastattelu lisäsi tutkimuksen luotettavuutta tältä osin merkittävästi. Haastattelun avulla mahdollistettiin myös uusien näkökulmien muodostuminen tutkittavasta asiasta.

Teemahaastattelussa tutkimusongelmasta poimittiin keskeiset teema-alueet, joita haastattelussa oli tutkimusongelmaan vastaamiseksi käsiteltävä. Kysymykset oli laadittu ennakkoon (liite 1) ja niiden järjestys pysyi samana koko haastattelun ajan. Haastattelun aikana esitettiin myös täydentäviä kysymyksiä ja palattiin käsittelemään uudelleen edellisten kysymysten sisältöä. Haastattelukysymykset lähetettiin ennakkoon haastateltavalle henkilölle, jotta haastateltavan valmius vaikean aihealueen haastatteluun olisi mahdollisimman hyvä. Toimenpiteellä haluttiin varmistaa dokumenttianalyysin kautta saadun tiedon syventäminen sekä luotettavuuden lisääminen. Haastattelu tallennettiin Teams-sovelluksella sekä kännykällä ja litterointi suoritettiin myöhemmässä vaiheessa. Haastattelun lisäksi reaktorivalvonnan pääinsinöörin kanssa käytyjen keskustelujen näkemyksiä on huomioitu tarkasteluissa. Seuraavissa alaluvuissa käsiteltiin teemoittain merkittävimmät löydökset huomioiden myös haastattelun tulokset.

8.2 Alikriittisyyteen vaikuttavien fysikaalisten tekijöiden tarkastelu

8.2.1 Polttoaineen lämpötila

Dokumenttianalyysin kautta todettiin, että polttoaineen lämpötilan muutos vaikuttaa reaktiivisuuteen Doppler-ilmiön takia. Doppler-ilmiössä U-238 resonanssivaikutusala kasvaa polttoaineen lämpötilan noustessa, jolloin mahdollisen fission aiheuttavia neutroneita hidastuu termiselle alueelle vähemmän ja reaktiivisuus pienenee. Dokumenttianalyysin kautta muodostettiin johtopäätös, että Doppler-ilmiön vaikutus takaisinkytkennän kautta alkaa vasta ydinteknisen lämmityksen alkaessa, eikä ole käytännössä voimassa polttoaineenvaihdossa. Dokumenttianalyysin kautta muodostettiin lisäksi johtopäätös, että polttoaineen lämpötila vaikuttaa reaktiivisuuteen myös ilman takaisinkytkentöjä. Ydinteknisellä lämmityksellä tarkoitetaan tilannetta, jolloin reaktorin tuottama teho vaikuttaa polttoaineen ja jäähdytteen lämpötilaan. Dokumenttianalyysin kautta analysoitiin myös ajanhetken merkitystä tutkittavaan asiaan, koska polttoaineen lämpötilaan vaikuttaa tehoajolta polttoaineenvaihtoon kulunut aika ja polttoaineenvaihdon kesto. Ajanhetken merkityksen todettiin olevan pieni polttoaineenvaihdossa, koska siirtyminen täydeltä teholta polttoaineenvaihtoon on ajallisesti pitkä. Ajanhetken merkityksen lisäksi polttoaineen lämpötilaan vaikuttaa jäähdytteen lämpötila ja jäähdytysnopeus.

Asiantuntijan mukaan polttoaineen todellista lämpötilaa ei pystytä mittaamaan korkean lämpötilan vuoksi. Teoreettisia laskelmia polttoaineen lämpötilasta suoritetaan, minkä perusteella polttoaineen lämpötila polttoaineenvaihdossa todennetaan. Polttoaineen suojakuori toimii ensimmäisenä leviämisesteenä varmistamassa polttoaineen eheyttä jäähdytteen menetyksessä. Mittauksen puuttumisen vuoksi suoraa havainnointia polttoaineenlämpötilan suhteen ei ollut mahdollista suorittaa. Lisäksi ensimmäisessä latauksessa kaikki polttoaine oli tuoretta. Haastattelun tuloksena saatiin varmistus dokumenttianalyysin tueksi, että polttoaineen lämpötilan muutos vaikuttaa aina reaktiivisuuteen. Polttoaineen lämpötilan laskiessa alikriittisyys heikkenee. Vaikutus reaktiivisuuteen on kuitenkin pieni polttoaineenvaihdossa. TTKE:n tutkimisella todettiin primääripiirin lämpötilan saavan olla korkeintaan 55 astetta. Muutokset polttoaineen lämpötilassa ovat pieniä polttoaineenvaihtoseisokin aikana, mikäli

primääripiirin jäähdytteen lämpötila pidetään jäähdytyksellä tasaisena. Polttoaineenvaihdossa jäähdytteen lämpötila oli lähes vakio, joten lämpötilalla ei ollut merkitystä polttoaineenvaihdossa. Ensimmäisessä latauksessa tilanteeseen vaikutti myös se, että polttoaineessa ei ollut myöhemmissä polttoaineenvaihdossa huomioitavaa jälkilämpöä. Johtopäätöksenä todettiin, että vaikutus alikriittisyyteen on merkittävämpi siirryttäessä täydeltä teholta polttoaineenvaihtoon kuin polttoaineenvaihdon aikana.

Reaktorialtaan veden boorikonsentraation on oltava TTKE:n mukaan vähintään 1550 ppm, joten pienillä lämpötilamuutoksilla ei ole vaikutusta kriittisyyturvallisuuteen myöskään korkean booripitoisuuden vuoksi. Haastattelun mukaan alikriittisyyden heikkeneminen vaatisi polttoaineenlämpötilan selkeän alenemisen tai booripitoisuuden alenemisen. Polttoaineen jäähdyttämällä on merkittävä vaikutus reaktorin turvallisuuteen polttoaineenvaihdon aikana reaktorin ollessa sammutettuna. Reaktorin jäähdytyksen menetys aiheuttaisi vakavimmillaan jäähdytteen kiehumisen, jolloin polttoaineen eheys vaarantuisi. OL3:lla jälkilämmönpoisto mereen varmistetaan kahdella järjestelmällä, jolla varmistetaan polttoaineen pysyminen ehjänä. TTKE vaatii kahden jälkilämmönpoiston osajärjestelmän olevan käyttökuntoinen käyttötilassa polttoaineenvaihto.

8.2.2 Jäähdytteen lämpötila

Dokumenttianalyysin avulla todettiin, että fissioreaktorissa syntyvillä neutroneilla on erilaisia kohtaloita. Doppler-ilmiötä analysoitaessa todettiin, että neutroneiden on mahdollista kaappautua resonanssiabsorptiossa U-238:aan ja olla aiheuttamatta fissiota. Neutroneilla on mahdollisuus myös hidastua termiselle alueelle ja aiheuttaa fissio U-235:n kanssa. Primääripiirin jäähdytteen tarkoituksena on hidastaa neutronit termiselle alueelle, jossa neutronien fissio on mahdollinen. Fissiolla tarkoitetaan ydinfysiikan reaktiota, jossa raskaan atomin ydin hajoaa kahdeksi pienemmäksi ytimeksi ja samalla vapautuu energiaa. Reaktiossa syntyy myös kaksi tai kolme uutta neutronia, jonka ansiosta ketjureaktio pysyy käynnissä. Jäähdytteen lämpötilan nousun vaikutuksesta jäähdytteen tiheys pienenee, jonka vuoksi neutroneita jarruttavien vetymolekyylien määrä vähenee jäähdytteessä. Tämän ansiosta termiselle alueelle

hidastuvien neutronien määrä vähenee ja reaktiivisuus pienenee vähentyvien fissioiden vaikutuksesta. Dokumenttianalyysin johtopäätöksenä todettiin, että jäähdytteen lämpötilan nousun aiheuttama reaktiivisuustakaisinkytkentä on negatiivinen normaalilla tehoajolla. Johtopäätöksenä todettiin myös, että jäähdytteen lämpötilan nousun aiheuttama reaktiivisuustakaisinkytkentä on positiivinen polttoaineenvaihdossa, koska hidastimen lämpötilakertoimeen vaikuttaa jäähdytteen lämpötilan lisäksi boorikonentraatio. Jäähdytteen lämpötilan vaikutus reaktiivisuuteen on positiivinen polttoaineenvaihtoseisokissa johtuen korkeasta booripitoisuudesta. Jäähdytteen lämpötilan noustessa jäähdytteen tiheys pienenee, jolloin myös neutroneita absorboivien booriatomien määrä pienenee jäähdytteessä. Johtopäätöksenä todettiin myös, että jäähdytteen lämpötilalla ei ole vaikutusta alikriittisyyteen booripitoisuuden ollessa riittävän korkealla tasolla. Polttoaineenvaihdossa jäähdytteen lämpötilan vaikutus reaktiivisuuteen on positiivinen toisin kuin tehoajolla.

Dokumenttianalyysin aikana tutkittiin liittyvien järjestelmien vaikutusta jäähdytteen lämpötilaan osatulosten ja johtopäätösten muodostamisen tueksi. Tutkimisen johtopäätöksenä todettiin, että merkittävin jäähdytteen lämpötilaan vaikuttava järjestelmä on teoriaosuudessa käsitelty jälkilämmönpoistojärjestelmä. Tämän lisäksi turvallisuusjärjestelmien dieselvarmennettu välijäähdytysjärjestelmä ja dieselvarmennettu merivesijärjestelmä täytyy olla käyttökuntoinen, jonka avulla jälkilämpö siirretään mereen primääripiiristä polttoaineenvaihdossa. TTKE:n mukaan kaksi jälkilämmönpoistojärjestelmää täytyy olla käyttökuntoisia käyttötilassa polttoaineenvaihto, joista toinen osajärjestelmistä yksi tai neljä ja toinen osajärjestelmistä kaksi tai kolme.

Haastattelu selvensi osaltaan jäähdytteen lämpötilan merkitystä reaktiivisuuteen. Haastattelussa vahvistettiin dokumenttianalyysin tulkinta, että jäähdytteen lämpötilalla ei ole merkitystä kriittisyysturvallisuuteen booripitoisuuden ollessa riittävän korkealla tasolla. Haastattelussa ilmeni myös näkökulma, jonka mukaan kriittisyys voidaan saavuttaa millä tahansa lämpötilalla riittävällä booripitoisuuden muutoksella. Lämpötilan vaikutus on pienimmillään latauksen jälkeisessä kriittisyydessä. Haastattelussa vahvistettiin myös dokumenttianalyysin johtopäätös, että polttoaineenvaihdossa jäähdytteen lämpötilan takaisinkytkennän etumerkki on positiivinen. Täydellä

teholla jäähdytteen lämpötilan takaisinkytkennän etumerkki on negatiivinen. Haastattelulla varmistuttiin, että polttoaineenvaihtoseisokissa jäähdytteen lämpötilan vaikutus reaktiivisuuteen on suurempi kuin polttoaineen lämpötilan vaikutus reaktiivisuuteen.

Jäähdytteen lämpötilan vaikutus alikriittisyyteen analysoitiin TTKE:n tutkimisella. Polttoaineenvaihdossa jäähdytteen lämpötila pidetään TTKE:n mukaan maksimissaan 55 asteessa. TTKE:n analysoimisella todettiin, että kaksi jälkilämmönpoistojärjestelmää täytyy olla käyttökuntoisia polttoaineenvaihdossa. Käyttökuntauudella tarkoitetaan sitä, että laitteet ovat linjattu oikein jälkilämmönpoistoa varten ja jälkilämmönpoiston imulinjan venttiilit ovat auki. Kaikkien osajärjestelmien pumppujen on kyettävä tuottamaan vaadittu minimivirtaus primääripiiriin ja järjestelmän lämmönvaihtimet täytyy olla toimintakuntoisia lämmön siirtämisen suhteen välijäähdytysjärjestelmien kautta mereen. Osajärjestelmien käyttökuntauisuuden suhteen esitettiin vaatimus, että osajärjestelmistä yksi tai neljä ja kaksi tai kolme täytyy olla kaksi jälkilämmönpoistojärjestelmää toimintakuntoisia. Poikkeamatilanteessa toimenpiteet kriiteerien palauttamiseksi on aloitettava heti, jonka jälkeen polttoaineenvaihto voi jatkuu.

Havainnointia käytettiin varmistamaan jäähdytteen lämpötila polttoaineenvaihdon aikana. Havainnoinnilla varmistettiin, että kaksi jälkilämmönpoistojärjestelmää olivat käytössä pitämään jäähdytteen lämpötilan alle 55 asteessa. Havainnoinnin osittaisena tukena käytettiin PICS-järjestelmän avulla saatavia historiatietoja.

8.2.3 Boorikonsentraatio

Primäärijäähdytteessä käytetään veteen liuennutta boorihappoa. Boori on valmistettu KBC-järjestelmässä sekoittamalla boorijauhetta lämpimään veteen, josta sitä toimitetaan eri järjestelmille niiden vaatiman booripitoisuuden mukaisesti. Booripitoisuuden vaikutus reaktiivisuuteen on negatiivinen, koska boori on tehokas neutroniabsorbaattori. Boori kaappaa itseensä neutroneita. Booripitoisuuden kasvu lisää booria absorboivien neutronien määrää jäähdytteessä, jolloin fissioita aiheuttavien neutronien määrä vähenee jäähdytteessä.

TTKE:n mukaan primääripiirin boorikonsentraatio pitää olla yli 1550 ppm ja B10-väkevöintiaste vähintään 30 atomiprosenttia polttoaineenvaihdossa. Raja-arvojen alituksesta kaikki reaktorisydämeen liittyvät muutokset, paitsi polttoainenippujen tyhjentäminen reaktorisydäimestä polttoainerakennukseen on keskeytettävä välittömästi. Lisäksi positiivisen reaktiivisuuden lisäykset, mukaan lukien toimenpiteet, jotka voivat johtaa boorin laimenemiseen on keskeytettävä välittömästi. Toimenpiteet booripitoisuuden palauttamiseksi takaisin 1550 ppm väkevöityä booria pitoisuuteen on myös aloitettava välittömästi. B10-väkevöintiaste tarkistetaan hätäjähdytysvesialtaasta ennen kuin reaktorialtaan täyttäminen aloitetaan. Laboratorio ottaa 8 tunnin välein manuaalisesti näytteen booripitoisuudesta, jotta varmistutaan booripitoisuuden olevan vähintään 1550 ppm.

Dokumenttianalyysin avulla muodostettiin johtopäätös, että boorikonsentraatio on tärkein yksittäinen tekijä alikriittisyyden varmistamisessa polttoaineenvaihdossa. Merkittävät rajoitustoimenpiteet TTKE:ssa booripitoisuuden osalta vaikuttivat osittain tulokinnan muodostumiseen. Haastattelu varmensi tulokinnan oikeaksi. Haastattelun avulla saatiin myös varmennus, että ladatussa sydämessä säätösauvat eivät yksinään riitä varmistamaan alikriittisyyttä polttoaineenvaihdossa. Alikriittisyyden varmistamiseen tarvitaan myös booria. Turvallisuusanalyysit tukevat myös tätä näkemystä. Huomioitavaa kuitenkin on, että alikriittisyys heikkenee aina boorin laimenemisen vaikutuksesta. Alikriittisyyden heikkeneminen aiheuttaa polttoaineenvaihdon keskeytyksen vasta, kun boorikonsentraatio laskee alle 1550 ppm. Booripitoisuuden laskun aiheuttamat turvallisuusvaikutukset ovat relevantteja selvästi alle polttoaineenvaihdon keskeytysrajan. Toisin sanoen polttoaineenvaihdon keskeytyminen on selvästi aikaisemmin kuin turvallisuus on todellisuudessa uhattuna.

Boorikonsentraatio täytyy olla TTKE:n mukaan yli 1550 ppm. Todellinen boorikonsentraatio pystytään varmentamaan laboratorion ottaman näytteen avulla, mikä lisää luotettavuutta päivävalvomossa käytettäviin mittauksiin. Havainnoinnin tuloksena huomattiin, että boorikonsentraatio oli polttoainelatauksen aikana noin 1650 ppm eli selvästi yli vaaditun minimipitoisuuden. Havainnointi suoritettiin PICS-järjestelmän historiatiedoista booripitoisuuden osalta. Booripitoisuuden osalta pystyttiin toteaa-

maan, että alikriittisyys ei ollut uhattuna polttoainelatauksen aikana. Boorimittauksen oskillointi aiheutti epävarmuutta mittaustulokseen PICS-järjestelmässä. Luotettavuutta alikriittisyyden heikkenemisen varmistamiseksi tuki kuitenkin laboratorion ottamat manuaaliset näytteet, joilla pystyttiin varmistamaan boorikonsentraatio luotettavasti.

8.2.4 Reaktorimyrkyt

Dokumenttianalyysin tuloksena todettiin, että reaktorimyrkkyjä ovat ksenon, samarium ja tuoreissa polttoainepuissa käytettävä gadolinium. Ksenon on fissiotuote, jota syntyy suoraan fission ja fission syntyvän jodin isotoopin hajoamisen kautta viiveellä. Ksenonin häviäminen tapahtuu beetahajoamisen kautta isotoopiksi Cesium-135 tai neutronikaappauksen kautta isotoopiksi Ksenon-136. Tehoa laskettaessa ksenonin määrä lähtee aluksi nousuun ja laskee myöhemmässä vaiheessa tehonlaskua vastaavaan tasapainotilanteeseen. Ksenonin nousu johtuu siitä, että tehoa laskettaessa ksenonia muodostuu korkeampaa tehotasoa vastaava määrä jodin beetahajoamisen kautta, koska hajoamisketjulla on noin seitsemän tunnin aikaviive. Ksenon on reaktorimyrkky, joka absorboi tehokkaasti neutroneita. Tämän johdosta fission aiheuttavien neutronien määrä pienenee ja reaktiivisuus vähenee. Dokumenttianalyysin johtopäätöksenä todettiin, että polttoaineenvaihdossa ksenonilla ei ole reaktiivisuusvaikutusta. Polttoaineenvaihdossa reaktori on sammutettu, eikä uutta ksenonia synny enää fission kautta. Lisäksi tehoajolta polttoaineenvaihto käyttötilaan tultaessa kestää ajallisesti niin kauan, että ksenon on ehtinyt häviämään reaktorista käytännössä kokonaan. Dokumenttianalyysin kautta muodostetulle johtopäätökselle saatiin vahvistus myös asiantuntijahaastattelun kautta. Haastattelussa vastattiin seuraavalla tavalla: ”käytetyssä polttoaineessa ksenon ei käytännössä ole merkittävä, koska yleisesti kylmäksi ajettaessa kestää sen verran kauan aikaa, että ksenon on käytännössä hävinnyt kokonaan”.

Samariumin vaikutus polttoaineenvaihdossa on merkittävämpi kuin ksenonin. Ksenonin kohdalla todettiin, että ksenonia ei synny polttoaineenvaihdon aikana lisää ja aikaisemmat pitoisuudet ovat hävinneet reaktorista polttoaineenvaihtoa aloitettaessa.

Samariumpitoisuus nousee polttoaineenvaihdon alussa johtuen samariumin stabiilisuudesta. Reaktorin ollessa sammutettuna samariumia syntyy vielä jonkin aikaa lisää U-235 fissiotuotteiden hajoamisen kautta, mutta ei häviä enää palamaan vaikuttavan neutronivuon kautta. Tästä johtuen samariumpitoisuus nousee polttoaineenvaihdon alussa. Tämä vaikuttaa reaktiivisuuteen alikriittisyyttä varmentavasti, koska samarium vähentää reaktiivisuutta. Samarium vaikuttaa myös kriittiseen booripitoisuuteen, kun reaktoria aloitetaan käynnistämään polttoaineenvaihdon jälkeen. Samarium on pysyvä isotooppi, joka häviää ainoastaan absorptiossa. Absorptiota ei tapahdu polttoaineenvaihdossa. Samariumin vaikutus parantaa alikriittisyyttä, koska reaktiivisuus pienenee pitoisuuden noustessa. Haastattelussa ilmeni, että samariumin pitoisuus kasvaa maltillisesti tasapainopitoisuuden saavuttamiseen asti. Polttoaineenvaihtoseisokeissa kasvua tapahtuu, mutta pitkissä vuosihuolloissa samarium saavuttaa tasapainotilanteen. Haastattelussa todettiin seuraavanlaisesti: ”Samariumilla on vaikutusta, mutta sen pitoisuudet ei vaihtelee ksenonin tapaisesti. Se on melko stabiilina. Samariumin pitoisuus kasvaa vuosihuoltoon mentäessä. Se vaikuttaa kriittiseen booripitoisuuteen käynnistettäessä reaktoria, mutta alikriittisyyteen sillä ei ole paljoa vaikutusta”. Haastattelussa todettiin myös, että jakson lopussa alas tultaessa korkea samariumpitoisuus saattaa estää paluun takaisin tehoajolle.

Gadoliniumin isotoopilla 157 on erittäin suuri termisten neutronien sieppausala. Toisaalta sillä on myös nopea palamisaika, joten gadolinium häviää reaktorista noin vuoden kuluessa. Reaktorivalvonnan päänsinöörin kanssa käydyssä keskustelussa selvisi, että gadoliniumia käytetään polttoaineenvaihdossa tuoreissa polttoainenipussa poistamaan ylijäämäreaktiivisuutta.

8.2.5 Palama

Dokumenttianalyysin johtopäätöksenä todettiin, että polttoaineen palama laskee sydämen ylijäämäreaktiivisuutta. Palamalla tarkoitetaan polttoaineen kulumista. Palaman edetessä booripitoisuutta on laskettava täyden tehon saavuttamiseksi. Jäähdytteen booripitoisuuden muutoksen vaikutus reaktiivisuuteen on hidas prosessi. Polttoaineenvaihdossa palamaa ei käytännössä enää ole reaktorin ollessa sammutettuna. Polttoaineenvaihtoseisokkiin mentäessä boorikonsentraatio on laskenut noin 10 ppm

pitoisuuteen käyttöjakson aikana ja säätösauvat ovat yläasennossa. Polttoaine on kuluttu loppuun mentäessä polttoaineenvaihtoseisokkiin. Dokumenttianalyysin johtopäätöksenä todettiin, että käyttöjakson lopussa reaktorisydän on vähemmän reaktiivinen kuin uudelle jaksolle ladattu reaktorisydän. Tämän vuoksi polttoaineenvaihtoseisokissa reaktorisydän pysyy alikriittisenä pienellä boorikonsentraatiolla. Boorikon-sentraatorajat määritetään mahdollisimman reaktiivisen tilan mukaan. Johtopäätöksenä todetaan, että palamalla on kuitenkin merkitystä alikriittisyyden kannalta polttoaineenvaihtoseisokissa.

Haastattelussa vahvistui palaman lukuarvon tärkeys, joka pitää olla käytössä laskennassa kokoa ajan. Palama on huomioitava laskettaessa alikriittisyyttä polttoaineenvaihdossa. Johtopäätöksenä todettiin, että palama on lukuarvona merkityksellinen määriteltäessä alikriittisyyttä. TTKE:n mukaan alikriittisyyden saavuttamisesta täytyy olla kulunut 60 tuntia ennen kuin polttoainesiirtoja voidaan suorittaa reaktorirakennuksessa. Prosessin kannalta palaman merkitys on pieni, koska polttoaineenvaihdossa boorikonsentraation rajat eivät muutu palaman funktiona. Boorikonsentraatorajat ovat määritelty rajoittavimman tilan mukaan.

8.2.6 Säätösauvat

Dokumenttianalyysin tarkastelun kautta todettiin, että säätösauvoilla on merkitystä alikriittisyyteen. Säätösauvoissa on sisällä absorbaattorimateriaalia, minkä vuoksi säätösauvojen asento vaikuttaa reaktiivisuuteen. Säätösauvat absorboivat itseensä neutroneita, jonka vuoksi reaktiivisuus on sitä negatiivisempi mitä enemmän säätösauvat ovat sisällä sydämessä. Säätösauvojen vaikutukseen vaikuttaa myös polttoaineen rikastusaste ja palama oltaessa tehoajolla. Polttoaineenvaihtoon tultaessa reaktori on sammutettu ja kaikki säätösauvat ovat sydämen alaosassa.

Haastattelussa todettiin, että säätösauvat ovat boorin kanssa tärkeimmät alikriittisyyteen vaikuttavat tekijät polttoaineenvaihdossa. Merkittävässä booripitoisuuden laimenemisessä säätösauvojen merkitys korostuu, koska booripitoisuuden merkitys alikriittisyyden varmistamisessa heikkenee. Dokumenttianalyysin lisäksi haastatte-

lussa kävi ilmi, että säätösauvojen oikea sijainti polttoaineniipuissa on merkityksellinen. Väärissä paikoissa polttoaineniipuissa olevat säätösauvat heikentäisivät alikriittisyyttä. Haastattelussa todettiin, että usealla merkittävällä latausvirheellä reaktori olisi mahdollista saada kriittiseksi polttoaineenvaihdossa käytetyllä booripitoisuudella.

Haastattelu ja havainnointi vahvistivat dokumenttianalyysin johtopäätöstä, että merkittävä latausvirhe on lähes mahdoton käytössä olevilla varmennuksilla. Polttoainerakennuksessa tarkastetaan, että jokainen säätösauvan sisäosa on oikeassa polttoaine-elementissä. Sydämen lopputarkastuksessa varmistettiin kameralla latauksen oikeellisuus myös STUK:n, Euratomin ja IAEA:n toimesta. Latausvirheen ehkäisemiseksi polttoaineensiirtokoneessa, latauskoneessa ja polttoaineensiirtoputkessa on tunnistin, joka tunnistaa oikean polttoaineniipun painon perusteella. Laitteistot ilmoittavat häiriöllä, mikäli polttoaineniipun paino poikkeaa kyseiseen asemaan tarkoitetun polttoaineniipun painosta. Säätösauvan sisältämä polttoaineniippu on painavampi kuin tulpattu tai neutronivuolähteille tarkoitettu polttoaineniippu. Siirtolistan avulla pystyttiin todentamaan polttoaineniipun oikea asema sekä sen sisältö polttoaineenvaihtoprosessin aikana.

8.2.7 Yhteenveto

Alikriittisyyteen vaikuttavien fysikaalisten ilmiöiden yhteenvetona todettiin, että merkittävimmät alikriittisyyteen vaikuttavat tekijät polttoaineenvaihdossa ovat boorikonsentraatio ja säätösauvat. Booripitoisuuden aleneminen alle 1550 ppm pitoisuuteen aiheuttaa polttoaineenvaihdon keskeytyksen ja toimenpiteet booripitoisuuden palauttamiseksi takaisin alueelle on aloitettava välittömästi.

Latausvirhe keskeyttää polttoaineenvaihdon tilapäisesti. Latausvirheestä järjestettäisiin erillinen kokous, jossa päätettäisiin jatkotoimenpiteistä. Latausvirheen aiheuttama viivettä polttoainelataukseen on vaikea arvioida, koska siihen vaikuttaisi olennaisesti virheen havaitsemisen ajankohta. Havainnoinnin perusteella virhe huomattaisiin lähes välittömästi moninkertaisen varmennuksen vuoksi. Merkittävin riski la-

tausvirheessä alikriittisyyden suhteen on säätösauvojen virheellinen sijainti. Latausvirheen ja säätösauvojen virheellisen sijainnin välttämiseksi polttoaineniiput tarkistettiin ennen polttoainelatauksen alkamista polttoainerakennuksessa. Polttoainelatauksen aikana varmistuttiin jokaisen polttoaineniipun kohdalla erikseen sen sisältämät sisäosat. Polttoaineniippu sisälsi säätösauvan tai tulppauselementin, mutta säätösauvan tunnistetta ei ollut mahdollista havaita polttoainesiirtojen aikana.

Polttoaineen ja jäähdytteen lämpötilan, reaktorimyrkkyjen ja palaman vaikutus alikriittisyyteen on selvästi pienempi kuin boorin ja säätösauvojen. Näillä kaikilla on kuitenkin merkitystä myös polttoaineenvaihdossa. Jäähdytteen lämpötilan merkityksellisyteen vaikuttaa jäähdytteen boorikonsentraatio. Kriittisyyttä ei pystytä saavuttamaan pelkällä jäähdytteen lämpötilan muutoksella, mikäli boorikonsentraatio ei samalla alene merkittävästi. Jäähdytteen lämpötilan nousu yli 55 asteen keskeyttää kuitenkin polttoaineenvaihdon ja toimenpiteet jäähdytteen lämpötilan palauttamiseksi takaisin alueelle on käynnistettävä välittömästi. Polttoaineen lämpötilan merkitys on pienempi kuin jäähdytteen lämpötilan merkitys. Polttoaineen lämpötilaan vaikuttaa jäähdytteen lämpötila, jäähdytyksen virtausnopeus ja tehoajolta polttoaineenvaihtoon kulunut aika. Polttoaine on jäähtynyt aloitettaessa polttoaineenvaihtoa, minkä lisäksi polttoaineen lämpötilan takaisinkytkentä on voimassa vasta ydinteknisessä lämmityksessä. Reaktorimyrkyistä vaikutusta todettiin olevan samariumilla ja tuoreissa polttoaineniipuissa käytetyllä gadoliniumilla. Gadolinium palaa ensimmäisessä käyttöjaksossa kokonaan pois. Ksenonilla ei todettu olevan vaikutusta polttoaineenvaihdossa, koska se on ehtinyt häviämään pois reaktorista ennen polttoaineenvaihdon alkamista. Samariumin vaikutus on alikriittisyyttä parantava, koska polttoaineenvaihdon alussa samarium absorboi neutroneita vähentäen reaktiivisuutta. Reaktorimyrkyistä ei aiheudu missään tilanteessa alikriittisyyden heikkenemistä polttoaineenvaihdossa. Palamalla ei ole myöskään merkitystä polttoaineenvaihdossa prosessin näkökulmasta. Palaman vaikutus polttoaineenvaihdossa perustuu ainoastaan lataussuunnitelmassa laskentoihin, joissa vaaditaan palaman numeerinen arvo alikriittisyyden varmistamiseen liittyviin laskentoihin.

8.3 Määräaikaiskokeiden vaikutusten tarkastelu

Dokumenttianalyysi toteutettiin analysoimalla Refueling Operation -vuokaavio-ohjeessa olevat määräaikaiskokeet. Ennen polttoaineenlatausta ohjeessa suoritettiin määräaikaiskokeet JNG-112-2, JNG-114-2 ja JND-120-2. Määräaikaiskokeiden suoritusohjeiden tutkimisella havaittiin, että määräaikaiskokeet olivat JNG- ja JND-järjestelmien toiminnallisia kokeita. Nämä järjestelmät ottivat imuveden hätäjähdytysvesialtaasta, jossa boorikonsentraatio oli yli 1550 ppm. Tällä perusteella pystyttiin toteamaan, että näillä määräaikaiskokeilla ei ole vaikutusta alikriittisyyteen. TTKE:n mukaan polttoaineenvaihdossa boorikonsentraatio täytyy olla vähintään 1550 ppm. Hätäjähdytysvesialtaan boorikonsentraatio on kaikissa tilanteissa laitoksella yli 1550 ppm, minkä vuoksi pystyttiin tekemään luotettava johtopäätös asiasta.

Polttoainelatauksen jälkeen ohjeessa suoritettiin määräaikaiskokeet FAF-137-4, FAF-135-4, LAR-110-2, JME-110-0, JME-130-4, GHC-120-2, JMA-170-4 ja JMA-180-4. Määräaikaiskokeiden suoritusohjeiden tutkimisella havaittiin, että määräaikaiskokeet liittyivät altaiden välisien luukkujen tiiveyksien testauksiin, sekundääripiirin hätäsyöttövesijärjestelmän toiminnallisiin kokeisiin sekä täyssuolanpoistetun veden jakelujärjestelmän toiminnallisiin kokeisiin sekundääripuolella. Järjestelmien toiminnan tutkimisella ja ymmärtämisellä laitoksen käyttöön pystyttiin toteamaan, että näillä määräaikaiskokeilla ei ollut vaikutusta alikriittisyyteen.

Dokumenttianalyysin avulla tehtiin johtopäätös, että laimennuslähteiden venttiileille ei suoriteta TTKE:n alaisia määräaikaiskokeita. Nämä venttiilit olivat kuitenkin yhteydessä primääripiiriin ja mahdollistivat booripitoisen jäähdytteen laimenemisen täyssuolanpoistetulla vedellä. Booripitoisen jäähdytteen laimeneminen aiheuttaisi alikriittisyyden heikkenemistä ja polttoainelatauksen keskeytymisen booripitoisuuden laskiessa alle 1550 ppm. Tämän vuoksi suoritettiin laimennuslähteiden erillinen tarkastelu.

Laimennuslähteet erotettiin Refueling Operation -ohjeessa. Tutkimalla venttiilien käyttötarkoitusta virtauskaavioiden ja järjestelmäkuvausten kautta todettiin, että

FAL15 AA009 -venttiiliä käytetään instrumentointielementtien varastoaltaan täyttämiseen täyssuolanpoistetulla vedellä. GHC73 AA004 -venttiiliä käytetään käytetyn polttoainealtaiden täyttöön täyssuolanpoistetulla vedellä. GHC74 AA061- ja AA062-venttiileitä käytetään altaiden pesuun, jota tarkastellaan tarkemmin työvaiheiden tarkastelun yhteydessä tämän luvun seuraavassa alaluvussa. JEB10/20/30/40 AA013 ja JEB10/20/30/40 AA022 syöttävät täyssuolanpoistettua vettä kaikille neljälle pääkiertopumpulle, josta olisi mahdollista päästä täyssuolanpoistettua vettä primääripiiriin. KBC10 AA001 syöttää täyssuolanpoistettua vettä KBC10-järjestelmän tankkiin, jossa valmistetaan 7000 ppm pitoista boorivettä. KBC10 AA014 -venttiili on rajapinta polttoainealtaiden puhdistusjärjestelmään, jonka kautta voidaan lisätä polttoainealtaisiin vettä. KBE40 AA003 ja 004 ovat täyssuolanpoistetun veden syöttöjä KBE-järjestelmään, joka on KBA-järjestelmään yhteydessä oleva primääripiirin jäähdytteen puhdistusjärjestelmä. Venttiileistä FAL15 AA009, JEB10/20/30/40 AA013, JEB10/20/30/40 AA022 ovat moottorikäyttöisiä venttiileitä ja KBC10 AA001, KBC10 AA014, KBE40 AA003 ja KBE40 AA004, GHC73 AA004, GHC74 AA061 ja GHC 74 AA062 ovat käsiventtiileitä. Näiden venttiilien kautta tapahtuva aiheeton laimeneminen havaittaisiin booripitoisuuden muuttumisena. Booripitoisuutta tarkkaillaan KUA-järjestelmän kautta sekä KBA-järjestelmän sisäänsyötön booripitoisuutta havainnoimalla. Suojausjärjestelmä kääntää automaattisesti booriveden ottamisen hätäjäähdytysvesialtaaseen KBA sisäänsyötön booripitoisuuden laskiessa kiinteän raja-arvon alapuolelle. Suojausjärjestelmän toimenpiteen tarkoituksena on varmistaa laimennustilanteessa hätäjäähdytysvesialtaasta 1550 ppm boorikonsentraatio.

Dokumenttianalyysin luotettavuutta lisättiin havainnoimalla valvomossa primääripiirin booripitoisuutta, joka ei laskenut suoritettaessa määräaikauskokeita. Booripitoisuutta mitattiin polttoainelatauksen aikana KUA-järjestelmän avulla. Booripitoisuuden mittaus oli epätarkka, jonka vuoksi booripitoisuus varmennettiin havainnoimalla säännöllisesti laboratorion ottamia näytteitä booripitoisuudesta. Tarkoituksetonta laimenemista ei havaittu booripitoisuudessa, mikä viittasi laimennuslähteiden oikeanlaiseen eristämiseen. Määräaikauskokeiden suorituksen aikana myöskään hälytysnäytölle ei ilmaantunut hälytyksiä, jotka olisivat viitanneet alikriittisyyden heikkeneemiseen määräaikauskokeita suoritettaessa.

Määräaikaiskokeiden osalta todettiin, että niiden suorittamisella ei ollut vaikutusta alikriittisyyteen polttoaineenvaihdon aikana. Refueling operation -ohjeessa suoritettavat määräaikaiskokeet eivät heikentäneet alikriittisyyttä. Laimennuslähteiden venttiilien kautta olisi ollut mahdollista päästä täyssuolanpoistettua vettä primääripiiriin, joka kuitenkin olisi havaittu booripitoisuuden laimenemisena PICS-järjestelmän tai laboratorion ottaman manuaalisen näytteen avulla.

8.4 Työvaiheiden vaikutusten tarkastelu

Työvaiheiden vaikutusten tarkastelu suoritettiin työvaiheille polttoaineensiirto, altaiden pesu ja työlupatoiminta. Tarkastelu suoritettiin kaikissa työvaiheissa dokumenttianalyysin ja havainnoinnin kautta, mutta painotukset vaihtelivat. Lisäksi polttoaine-siirtojen kohdalla haastattelun avulla lisättiin luotettavuutta.

8.4.1 Polttoainesiirrot

Polttoainesiirtojen vaikutusten tarkastelu suoritettiin dokumenttianalyysin, havainnoinnin ja haastattelun kautta. Havainnoinnin yhteydessä keskusteltiin työsuorituksiin osallistuvien henkilöiden kanssa työvaiheista ja toimintatavoista. Keskustelujen tarkoitus oli lisätä havainnoinnin luotettavuutta ja estää väärinkäsitysten muodostumista. Keskustelut eivät olleet haastatteluja, vaan tukemassa havainnointia.

TTKE:n mukaan reaktorialtaan pinnankorkeus täytyy olla vähintään 18,95 metriä käyttötilassa polttoaineenvaihto. Reaktorialtaan pinnankorkeuden ollessa alle sallitun rajan, reaktorisydämen muutokset on keskeytettävä välittömästi ja polttoaineniippujen siirrot on keskeytettävä välittömästi. Toimenpiteet reaktorialtaan pinnan nostamiseksi sallittuihin rajoihin on aloitettava välittömästi. Reaktorialtaan pinta pysyi polttoaineenvaihdon aikana sallituissa rajoissa, eikä sillä ollut vaikutusta alikriittisyyteen tai polttoaineenvaihdon etenemiseen. Reaktorialtaan pintaa tarkkailtiin käytännössä koko ajan. TTKE:n mukaan reaktorialtaan pinnankorkeuden tarkkailu on suoritettava vähintään 24 tunnin välein. Instrumentointielementtien käsittelyn aikana reaktorialtaan pinnankorkeus täytyi olla vähintään 19,30 metriä. Reaktorialtaan

pinnan nosto suoritettiin 1550 ppm pitoisella boorijäähdytteellä hätäjäähdytysvesialtaasta, jolloin alikriittisyys oli varmistettu myös nostettaessa pintaa.

Dokumenttianalyysissä perehdyttiin myös ohjeeseen Phase Commissioning Program for First Core Loading sekä dokumenttiin OL3-lataussuunnitelma. Ensimmäinen asiakirja oli englanninkielinen ja jälkimmäinen suomenkielinen. Laajaan englanninkieliseen dokumenttiin perehtyminen vaati tutkimusaineiston tiivistämistä ja aineiston ryhmittelemistä johdonmukaiseksi kokonaisuudeksi. Tämän jälkeen dokumenttianalyysin kautta oli polttoainesiirtojen kulku selvillä pääpiirteissään, jonka luotettavuutta lisättiin havainnoinnin ja haastattelun kautta. Alikriittisyyden varmistamisen kannalta dokumenttianalyysin kautta saatiin selville, että polttoainesiirtojen aikana varmistettiin useassa eri kohdassa lataussuunnitelman mukainen eteneminen. Asian-tuntijanhaastattelu tuki johtopäätöstä.

Dokumenttianalyysin ja havainnoinnin kautta todettiin, että latausvirheen mahdollisuus on erittäin pieni polttoaineenvaihdon aikana. Polttoainelatauksessa käytettävän CCU-ohjelman tarkoitus on varmentaa, ettei latausvirhettä pääse syntymään. Polttoainesiirtojen aikana polttoainenipun oikea positio varmistettiin kaikkien siirtojen osalta erikseen ennen kuin polttoainenippu laitettiin lopulliseen asemaansa reaktorissa. Dokumenttianalyysin ja haastattelun avulla todettiin, että polttoaineensiirtokoneessa, polttoaineensiirtolaitteistossa ja latauskoneessa on polttoainenipun painoa indikoiva tunnistin. Tunnistimen avulla havaittiin nostettavan polttoainenipun painon eroaminen lataussuunnitelmaan oletuksena asetetusta polttoainenipun painosta. Tilanne tarkoittaisi latausvirhettä ja lataus keskeytettäisiin tilapäisesti. Jatkotoimenpiteet päätettäisiin erillisessä kokouksessa. Alikriittisyyden merkittävää heikkenemistä ei tällaisessa tapauksessa pääsisi syntymään, mikäli virhe huomattaisiin riittävän ajoissa. Haastattelussa todettiin, että yhden polttoainenipun virheellinen sijainti sisältäisi sulkumarginaaliin alikriittisyyden suhteen. Useamman polttoainenipun virheellisen sijainnin vaikutus alikriittisyyteen riippuisi virheellisten polttoainenippujen sijainnista reaktorisydämessä. Ensimmäisessä latauksessa polttoaineniput ja niiden sisältämien sisäosien tunnistukset oli suoritettu etukäteen polttoainerakennuksessa. Toimenpiteellä varmistettiin, että polttoaineniput olivat oikeissa positioissa polttoai-

nerakennuksessa lataussuunnitelman mukaisesti ja sisäosat olivat oikeissa polttoainenuippuissa. Lopputarkastuksessa polttoainenuippujen sijainnin varmisti Euratomin, IAEA:n ja STUK:n edustajien lisäksi TVO:n edustajat. Havainnoinnin tuloksena todettiin, että sydämen lopputarkastus suoritettiin ammattimaisesti, eikä poikkeamia lataussuunnitelmaan havaittu.

Polttoainesiirtojen vaikutus alikriittisyyteen toteutettiin suorittamalla havainnointia polttoainelatauksen aikana sekä keskustelemalla reaktorivalvonnan asiantuntijoiden kanssa havainnoinnin yhteydessä dokumenttianalyysin kautta saadun tiedon tueksi. Ojasalon ym. (2014, 29) mukaan havainnoinnilla on tarkoitus saada välitöntä ja suoraa tietoa ihmisten toiminnoista luonnollisessa ympäristössä. Tämän vuoksi polttoainesiirtojen havainnointia suoritettiin myös ennen varsinaista polttoainelatausta havainnoimalla harjoitteluun tarkoitettujen polttoainenuippujen siirtoja. OL3:lla polttoainelataus suoritettiin ensimmäistä kertaa, jonka vuoksi polttoainelatausta harjoiteltiin siihen erikseen suunnitelluilla polttoainenuipuilla. Polttoainesiirtojen harjoitteluun tarkoitettut polttoainenuiput olivat täysin identtisiä oikeiden polttoainenuippujen kanssa, mutta ilman polttoainetta.

Siirtoharjoittelun havainnointi oli vapaata ja luonnolliseen toimintaan mukautunutta havainnointia, joka oli lähempänä osallistuvaa havainnointia kuin ulkopuolista tarkkailijaa. Havainnointia suoritettiin osallistumalla läheisesti ryhmän toimintaan ja keskusteluihin, joista tehtiin tulkintoja. Organisaatio ja toimintatavat vastasivat oikeaa polttoainelatausta, mutta keskustelu oli vapaamuotoisempaa kuin myöhemmässä vaiheessa suoritettussa virallisessa polttoainelatauksessa. Havainnointia pystyttiin suorittamaan polttoainesiirtojen harjoittelun aikana yksityiskohtaisemmin kuin virallisen polttoainelatauksen aikana, koska havainnoitsijan aiheuttamaa häiriötä ei tarvinnut huomioida vastaavasti kuin virallisessa polttoainelatauksessa. Tämän johdosta pystyttiin syventymään laitteistojen toimintaan paremmin. Tarkoituksena oli havainnoida myös polttoainelataukseen osallistuvan organisaation toimintaa sekä vertailla toimintaa dokumenttianalyysin kautta kerättyyn tietoon. Havainnoinnin tarkoitus oli saada mahdollisimman monipuolista tietoa polttoainelatauksesta tukemaan dokumenttianalyysin kautta saatua tietoa. Havainnointi suoritettiin joustavana toimin-

tana, jolloin huomattiin inhimillisten tekijöiden vaikutus toiminnassa paremmin. Johdtopäätöksenä todettiin latausharjoittelun onnistuneen hyvin lukuun ottamatta laitteistojen teknisiä ongelmia.

Virallisessa polttoainelatauksessa havainnointia suoritettiin järjestelmällisesti päivävuorojen aikana. Polttoainelataus suoritettiin keskeytymättömänä kolmivuorotyönä, jonka vuoksi havainnoinnin tukena käytettiin päiväkirjaa. Päiväkirjamerkinnoista oli mahdollista huomata polttoainelatauksen poikkeamat, joilla voisi olla vaikutusta alikriittisyyteen polttoainelatauksen aikana. Päiväkirjamerkinnoissa havaittiin yhden lähdealueen anturin signaalin menetys, joka aiheutti myös ongelmia ensimmäisessä latauksessa käytettävän Supplementary Neutron Detector System -päätteen (SNDS) toimintaan. SNDS-päätteellä mitattiin ensimmäisessä latauksessa erillisen ohjelmiston kautta pulssitaajuutta. Ensimmäisessä latauksessa käytettiin erillisiä neutronilähteitä, joiden avulla varmistettiin riittävä pulssimäärä lähdealueen detektorin toiminnan varmistamiseksi. Luotettavuuden lisäämiseksi päiväkirjamerkintä käsiteltiin myös haastattelussa. Lähdealueen detektorin signaalin menetys viivästytti polttoainelatausta noin yhden tunnin. Havainnoinnin vaikutus alikriittisyyteen käsitellään tarkemmin automaatiota käsittelevässä alaluvussa. Päiväkirjamerkinnoissa huomattiin myös CCU-päätteen siirtotiedostojen käytön lopettaminen erillisen kokouksen tuloksena polttoainelatauksen aikana johtuen toistuvista teknisistä ongelmista. Havainnoinnin ja haastattelun perusteella asia ei aiheuttanut riskiä alikriittisyyden heikkenemisen suhteen. Muutoksen jälkeen latauskoneen kuljettaja merkitsi kosketusnäytölle position reaktorisydämessä, jonka latausvalvoja varmisti. CCU merkitsi reaktori sydämen position automaattisesti latausvalvojan hyväksynnän kautta.

Polttoainelataus suoritettiin suunnitellulla tavalla edellä mainittuja poikkeuksia lukuun ottamatta sekä dokumenttianalyysin kautta kerätyn tiedon mukaisesti. Alikriittisyyden kannalta ei havaittu merkittäviä riskitekijöitä polttoainelatauksen aikana. Polttoaineniippujen oikeanlainen sijoittelu käytetyn polttoaineen altaissa varmistettiin ennen polttoainelatauksen aloittamista käyttömääräimen mukaisesti. Tässä yhteydessä varmistuttiin, että sisäosat olivat oikeissa polttoaineniipuissa. Polttoaineniipun oikeellisuus tarkistettiin nostettaessa polttoaineniippua käytetyn polttoaineen altaasta polttoainerakennuksessa. Virallinen polttoaineniipun oikeellisuuden tarkistus

suoritettiin latausvalvojan toimesta hyväksymällä siirto oikeaan positioon reaktorissa. Polttoainesiirroissa käytettiin myös paperista siirtolistaa (liite 2). Havainnoitsijan tulkinnan mukaan paperisella siirtolistalla haluttiin ehkäistä teknisten ongelmien aiheuttamia virheitä käyttämällä tietokonepäänteen lisäksi perinteistä paperiversiota. Siirtolistassa olennaista oli tarkistaa polttoaine-elementin tunnus sekä polttoainenipun sisäosien tunnus. Sisäosien tunnuksen tarkoituksena oli saada tietää, sisältävätkö polttoainenipun sisällä olevat ohjausputket neutronivuon kasvattamiseen tarkoitettuja neutronivuon lähteitä, säätösauvoja (RCCA) vai onko ohjausputket tulpattu liiallisen ohivirtauksen vuoksi polttoainenipun sisällä. Polttoainelatauksen jälkeen suoritettiin virallinen sydämen lopputarkastus, jossa olivat mukana IAEA, Euratom ja STUK. Sydämen lopputarkastuksessa ei havaittu poikkeamaa suunnitellusta latauksesta (liite 3).

Polttoainelatauksessa käytettiin yrityksen HU-työkaluja hyväksi, mikä tuki alikriittisyyden varmistamista. Ennen polttoainelatauksen aloittamista pidettiin aloituspalaveri ja polttoainelatauksen jälkeen lopetuspalaveri. Kommunikaatio oli selkeää ja riippumatonta varmennusta käytettiin polttoaineniippujen siirroissa. Siirtolistojen hyväksymisprosessissa käytettiin riippumatonta varmennusta. Valvomo oli tietoinen latauksen etenemisestä hyvän kommunikoinnin ja valvomossa käytettävän CCU:n ansiosta. Ensimmäisessä latauksessa päävalvomossa oli erikseen polttoainelatausta valvova henkilö. Myöhemmissä latauksissa suojarakennuksessa oleva latausvalvoja on yhteydessä suoraan valvomohenkilökuntaan.

Polttoainelatauksen aikana käyttövuoro varmisti, että laitos pysyi TTKE:n määrittelemässä turvallisessa tilassa. TTKE:n kannalta merkittäviä seurattavia asioita olivat boorikonsentraatio, reaktorialtaan pinnankorkeus, jälkilämmönpoistojärjestelmän toiminta, lähdealueen neutronivuodetektorin käyttökuntoisuus ja riittävän suojarakennuksen alipaineen varmistus. Suojarakennuksen riittävä alipaine oli osa suojarakennuksen läpivientien vaatimuslistaa. Nämä kaikki pysyivät TTKE:n mukaisessa tilassa ja alikriittisyys ei heikentynyt polttoainelatauksen aikana. Käyttövuoro varmisti asiat päävalvomossa, eikä hälytyksiä edellä mainituista asioista tullut.

Dokumenttianalyysin, haastattelun ja havainnoinnin yhteisvaikutuksella muodostettiin johtopäätös, että polttoaineniippujen käsittely suoritettiin hyväksytyllä laitteistolla, tartunta varmistettiin kameralla ennen jokaista nostoa ja polttoainesiirtoja suorittivat vain hyväksytyt henkilöt. Reaktorirakennuksen, polttoainerakennuksen ja päävalvomon välinen puhelinyhteys oli myös kunnossa. TTKE:n mukaan ennen polttoaineensiirtojen aloittamista reaktorirakennuksessa alikriittisyyden saavuttamisesta on täytynyt kulua 60 tuntia. Tämä tarkoittaa, että myöhemmissä latauksissa polttoainesiirrot voidaan aloittaa 60 tunnin kuluttua reaktorin alasajosta.

8.4.2 Altaiden pesu

Altaiden pesun tarkoitus oli irrottaa altaiden seinämiin kiteytynyt boori pinnan laskun yhteydessä. Altaiden pesu suoritettiin käyttämällä täyssuolanpoistettua vettä. Täyssuolanpoistettu vesi laimentaa booripitoista vettä, joten sillä on vaikutusta reaktiivisuuteen, mikäli laimentunut boorivesi johdetaan takaisin primääripiiriin. Booripitoisuuden laimeneminen vähentää neutroneita absorboivien partikkeleiden määrää, jonka vuoksi alikriittisyys heikkenee.

Altaiden pesun tarkastelu suoritettiin dokumenttianalyysin ja havainnoinnin avulla. Refueling Operation -ohjeen ja käyttömääraimien tarkastelussa havaittiin, että altaiden pesua ei huomioitu niissä. Dokumenttianalyysin kautta tarkasteltiin lisäksi dokumentteja täyssuolanpoistetun veden käyttö polttoaine- ja reaktorirakennusten altaiden läheisyydessä tai altaissa tapahtuvissa töissä sekä täyssuolanpoistetun veden käyttö boorivettä sisältävissä järjestelmissä. Näiden dokumenttien avulla pystyttiin muodostamaan johtopäätös, että altaiden tarkoitukseton laimeneminen ei ole todennäköistä ohjeita noudattamalla. Täyssuolanpoistetun veden käyttö reaktori- ja polttoainealtaiden läheisyydessä on luvanvaraista. Altaiden pesuun tarvitaan myös työ lupa. Täyssuolanpoistetun veden määrä altaiden pesussa on arvioitava etukäteen, jonka perusteella lasketaan laimennusvaikutus olemassa olevaan booripitoisuuteen. Käytetyn booriveden määrä kirjataan ja toimenpiteen jälkeen boorikonsentraatio varmennetaan laboratorion suorittamalla analyysillä. Altaiden pesun merkitykseen

alikirittisyyden näkökulmasta vaikuttaa altaiden pesuvesien loppukohde, koska pesuun käytetään täyssuolanpoistettua vettä. Altaiden pesu laimentaa booripitoisuutta vain siinä tapauksessa, että pesuvedet johdetaan takaisin primääripiiriin.

Altaiden pesun aloittaminen täyssuolanpoistetulla vedellä edellytti etukäteen kaavakkeen täytön (liite 4), jossa vaadittiin työlupa aloittamiselle sekä selvitys täyssuolanpoistetun veden käyttötarkoituksesta. Kaavakkeeseen täytettiin etukäteisarvio käytettävästä veden määrästä sekä alkuperäinen boorikonsentraatio. Altaiden pesun jälkeen kaavakkeeseen täydennettiin todellinen käytetyn veden määrä sekä lopullinen boorikonsentraatio altaiden pesun jälkeen. Lopullinen boorikonsentraatio todennettiin laboratorion ottamalla näytteellä primääripiirin vedestä. Boorikonsentraation ei todettu laimentuvan altaiden pesussa lainkaan johtuen pesuun käytetyn veden pienestä määrästä.

Todellinen käytetyn veden määrä pystyttiin toteamaan suojarakennuksessa PICS-järjestelmän avulla GHC-järjestelmän mittauksista, jotka ilmoittivat käytetyn veden määrän kuutioina suojarakennuksessa. Lisävarmistuksena suojarakennuksessa käytetyissä vesiletkuissa oli virtausmittaus, josta pystyttiin todentamaan käytetyn veden määrä. Suojarakennuksessa altaiden pesu suoritettiin venttileiden GHC74 AA061 ja AA062 kautta. Nämä venttiilit olivat erotettuina polttoainelatauksen aikana mahdollisina laimennuslähteinä. Polttoainerakennuksessa altaiden pesuun tarkoitettun veden määrä nähtiin ainoastaan letkussa olevasta mittarista. PICS-järjestelmän avulla ei havaita polttoainerakennuksen altaiden pesuun käytettyä vesimäärää. Käytetyn veden määriä havainnoitiin myös PICS-järjestelmästä nähtävistä historiatiedoista, joista pystyttiin vahvistamaan altaiden pesuun käytettävien vesimäärien olleen melko pieniä myös aikaisemmin suoritettujen pesujen yhteydessä. Toisin sanoen altaiden pesulla ei ole merkitystä alikirittisyyden heikkenemiseen siinä määrin, että boorikonsentraatio laskisi alle 1550 ppm pitoisuuden ja keskeyttäisi tilapäisesti polttoaineenvaihdon.

Havainnoinnin kautta ja keskustelemalla tällä hetkellä altaiden pesusta vastaavan henkilön kanssa selvisi, että veden kulutuksen määriin vaikuttaa altaiden pesun alkamisajankohta. Boori kiteytyy altaiden seinämiin tiukempaan, mitä kauemmin aikaa

on kulunut altaan pinnan laskusta. Polttoainelatauksen yhteydessä käytetty täyssuolanpoistetun veden määrä pystyttiin minimoimaan, koska altaiden pesu aloitettiin heti pinnan laskun yhteydessä. Havainnoitsijan suorittamassa historiatietojen tarkastelussa havaittiin pientä veden määrän vaihtelua altaiden pesujen yhteydessä. Veden määrien vaihtelun todettiin johtuvan pesun alkamisajankohdasta suhteutettuna altaiden veden pinnan muutoksiin.

Altaiden pesulla ei todettu olevan vaikutusta alikriittisyyteen polttoaineenvaihdossa. Ensimmäisessä latauksessa altaiden pesu suoritettiin siten, että altaiden yläosan pesuun käytetty täyssuolanpoistettu vesi johdettiin primääripiiriin. Primääripiiriin johdettavan veden määrä oli vain 0,40 m³. Määrä oli arvoitua määrää selvästi pienempi. Tällaisella määrällä ei todettu olevan lainkaan vaikutusta alikriittisyyteen. Loppuosa altaiden pesuvesistä johdettiin erilliseen järjestelmään, joka ei laimentanut primääripiirin vettä lainkaan. Altaiden pesu suoritettiin työluvalla, jonka palautustoimenpiteet mahdollistivat vesien johdattamisen erilliseen järjestelmään altaiden pesun loppuunsaattamisessa.

Seuraavissa latauksissa reaktorikantta lasketaan altaiden pinnan laskun kanssa samaan aikaan, jolloin reaktorikansi toimii säteilysuojana. Reaktorikannen ollessa kiinni, altaiden pesuun käytetty täyssuolanpoistettu vesi johdetaan erilliseen vesien käsittelyjärjestelmään. Altaiden pesuissa käytetyt täyssuolanpoistetun veden määrät ovat joka tapauksessa suhteessa melko pieniä verrattuna altaissa olevan booripitoisuuden jäädytteen määrään, joten pesujen vaikutus alikriittisyyteen on lähes merkityksetön kaikissa tapauksissa. Lisäksi pesun vaikutus arvioidaan etukäteen, jolloin reaktiivisuus vaikutus on huomioitu. Altaiden pesun merkityksellisyyteen vaikuttaa myös alkuperäinen boorikonsentraatio. Ensimmäisessä latauksessa primääripiirin boorikonsentraatio oli selvästi yli TTKE:n vaatiman vähimmäisrajan.

8.4.3 Työlupatoiminta

Työlupatoiminnan vaikutuksen tarkastelu alikriittisyyteen toteutettiin havainnoimalla toimintaa ja yhdistämällä havainnointia työlupatoiminnan ohjeistuksiin dokumentti-analyysin kautta.

Työlupatoimintaa käsittelevissä dokumenteissa todettiin, että työluvalla hallitaan töitä varten tehtäviä erotus- ja palautustoimenpiteitä. Vuosihuollon aikana työluvakonttori vastaa työlupatoiminnasta ja määrittää työluvan erotus- ja palautustoimenpiteet. Tämän jälkeen työlle määritellyt turvatoimet valmistellaan. Alikriittisyyden näkökulmasta polttoaineenvaihtoseisokissa tämä tarkoittaa sitä, että laimennuslähteiden erotuksen yhteydessä venttiilit suljetaan ja niihin laitetaan erotuslappu. Erotuslappulla osoitetaan, että venttiilin asentoa ei pystytä muuttamaan sekä venttiilin erotuksen mukainen oikea asentotieto.

Työlupatoiminnalla on merkitystä alikriittisyyteen polttoaineenvaihdon aikana. Onnistuneen työsuorituksen varmistamiseksi työluva on pitänyt valmistella oikein sekä työkohteessa suoritettavat venttiilien erotustoimenpiteet valmistella oikein. Havainnoinnin perusteella todettiin, että syvyysuuntainen turvallisuusajattelu sekä yrityksessä käytössä olevat HU-työkalut tukevat erotustoimenpiteiden onnistunutta työsuoritusta. Työlupaprosessi on vaiheistettu ja useat eri ihmiset tarkastivat työluvan ennen työluvan osoittaman tehtävän konkreettista suoritusta. Työsuoritus toteutettiin laitoksella kahden henkilön toimesta HU-työkalujen ohjeistuksen mukaisesti. Työ toteutettiin parityöskentelynä, jolloin toinen henkilö toteutti työn ja toinen henkilö varmisti työsuorituksen. Teoriassa on mahdollista, että venttiili jätetään väärään asentoon erotuslistassa olevan virheen vuoksi tai toteutusvaiheessa suoritettun virheen vuoksi. Havainnoinnin perusteella todettiin, että alikriittisyyden heikkenemisen riski on pieni työlupatoiminnan kannalta. Lisäksi laimeneminen havaittaisiin boorimitauksista, jolloin primäärijäähdytteen laimenemisen lähde selvitettäisiin. Tällaisessa tapauksessa polttoaineenvaihto keskeytyisi, mikäli boorikonsentraatio laskisi alle 1550 ppm.

Havainnoinnin johtopäätöksenä todettiin myös, että polttoaineenvaihdon aikana SRD-mittauksen menetys johtui työlupatoiminnasta. Mittauksen menetyksellä ei ollut vaikutusta alikriittisyyteen, mutta polttoaineenvaihto keskeytyi noin yhden tunnin ajaksi. Polttoaineenvaihdon aikana laitoksella suoritettavat muut erotus- ja palautustoimenpiteet on yleensä minimoitu, joten niiden kautta muodostuva riski alikriittisyyden heikentymisen suhteen on kuitenkin pieni. Työlupatoiminta on lisäksi vaiheistettu ja varmennettu usean eri henkilön tarkastuksen kautta.

Työlupatoiminnalla on vaikutusta alikriittisyyteen ja polttoaineenvaihdon etenemiseen. Alikriittisyyden suhteen merkittävin toiminta koskee laimennuslähteiden erotusta. Venttiilien ollessa virheellisessä asennossa tai vuotaessa booripitoinen jäädyte laimenee. Laimennus havaittaisiin todennäköisesti lyhyellä aikavälillä boorimitauksista tai laboratorion ottamasta näytteestä. Lisäksi TTKE:n mukaan laimennuslähteiden paikallinen tarkistus on suoritettava kerran viikossa, jolloin venttiilien virheellinen asento todennäköisesti havaittaisiin.

8.5 Automaation merkityksen tarkastelu

Automaation merkityksen tarkastelu suoritettiin dokumenttianalyysin, havainnoinnin ja haastattelun kautta. Automaation havainnointia suoritettiin ensimmäisessä polttoainelatauksessa poikkeuksellisesti myös suojarakennuksessa. SNDS-päätteellä mitattiin latauksessa erillisen ohjelmiston kautta pulssitaajuutta suojarakennuksessa.

Dokumenttianalyysin kautta tarkasteltiin alikriittisyyteen liittyviä hälytyksiä ja niistä aiheutuvia seurauksia ja rajoituksia. Alikriittisyyden näkökulmasta merkityksellistä on, että hälytys havainnoidaan valvomossa mahdollisimman nopeasti ja reagoidaan siihen oikeanlaisesti. Alikriittisyyden varmistamisen näkökulmasta toiminnassa korostuu selkeä viestintä ja ohjeiden oikeanlainen käyttö. Hälytys JRY03 EY294X XM01, jonka kuvausteksti on SRD FLUX AL, aktivoi suojarakennuksen evakuoinnin. Tämä tarkoittaisi sitä, että polttoaineenvaihto keskeytyisi tilapäisesti. Hälytys voi tulla ilman todellista alikriittisyyden heikkenemisvaaraa, mikäli HQNS1-arvoa ei päivitetä lähdealueen neutronivuon arvon noustessa. Arvon päivitys suoritetaan polttoaineenvaihdon jälkeisessä laitoksen ylösajossa. Havainnoinnin perusteella ensimmäisessä latauksessa arvon päivitykselle ei ollut tarvetta, koska SRD-mittausten pulssitaajuus oli suurimmillaan noin kaksi pulssia sekunnissa johtuen jälkilämpötehon puuttumisesta. Myöhemmissä latauksissa SRD-mittausten pulssitaajuus on haastattelun mukaan kymmeniä pulsseja sekunnissa. Pulssitaajuudella indikoidaan fyysisesti detektoriin osuneiden neutronien määrää. SRD-detektorien kalibroinnilla määritellään arvo, jonka detektori tulkitsee pulssiksi. Dokumenttianalyysin ja havainnoinnin johtopäätöksenä todettiin, että myös virheellinen signaali voi aiheuttaa hälytyksen ja tilapäi-

sen keskeytyksen polttoaineenvaihdolle. Käyttömääräimen mukaan yhdeksän ladattun polttoainepin jälkeen SRD-detektorien mittausta muutettiin sellaiseksi, että yhden mittauksen vikaantuminen kolmesta voi aiheuttaa hälytyksen aiheuttaman toiminnon. Hälytys JRY03 EY294X XM01, jonka kuvausteksti on SRD FLUX AL aktivoi suojarakennuksen evakuoinnin. Hälytys JRY03 EY909X XD01, jonka kuvausteksti on EBS ACTUATION AL kytkee päälle järjestelmissä aikaisemmin käsitellyn hätäboorausjärjestelmän käynnistymisen. Järjestelmä syöttäisi primääripiiriin noin 7000 ppm pitoista boorivettä ja signaalin johdosta siirryttäisiin hätätilanneohjeeseen.

Havainnoinnin kautta todettiin, että SRD-mittaukset toimivat latauksen aikana. SRD-mittauksia käytetään neutronivuon tarkkailuun polttoaineenvaihdossa. Pulssitaajuus kasvoi latauksen etenemisen myötä ja kahdentumisaika pieneni ladattaessa polttoainepinuja SRD-detektorien läheisyyteen. Kahdentumisaika indikoi aikaa, jonka aikana teho kaksinkertaistui alkuperäiseen arvoonsa verrattuna. Päiväkirjamerkinnoissä havaittiin yhden lähdealueen anturin signaalin menetys polttoainelatauksen aikana, joka aiheutti myös ongelmia ensimmäisessä latauksessa käytettävän SNDS-päätteen toimintaan. SNDS-päätteellä mitattiin ensimmäisessä latauksessa erillisen ohjelmiston kautta pulssitaajuutta. Ensimmäisessä latauksessa käytettiin erillisiä ulkopuolisia neutronilähteitä, joiden avulla varmistettiin riittävä pulssimäärä SRD-detektorien toiminnan varmistamiseksi. Luotettavuuden lisäämiseksi päiväkirjamerkintä käsiteltiin myös haastattelussa. SRD-signaalin menetys johtui automaatio-osaston suorittamasta erotuksesta työlupakonttorin hyväksynnän mukaisesti. Haastattelun tuloksena todettiin myös, että kolmannen polttoainelatauksen jälkeen SRD-detektorien toimintatarkkuus on lopullisella tasolla johtuen jälkilämpötehon määrästä. SRD-signaalin menetyksellä ei ollut vaikutusta alikriittisyyteen. SRD-signaalin menetys viivästytti polttoainelatausta noin yhden tunnin.

Alikriittisyyden heikkeneminen havaittaisiin booripitoisuuden alenemisena. Tämä tarkoittaisi sitä, että primääripiiriin pääsisi tarkoituksettomasti laimeampaa vettä. Boorikonsentraatio todettaisiin KUA-järjestelmän mittauksen kautta, josta voidaan todeta primääripiirin todellinen boorikonsentraatio. KBA-järjestelmän sisäänsyötöstä havaitaan primääripiiriin syötettävän veden boorikonsentraatio, joka normaalikäytössä

vaihtelee laitoksen tilanteen mukaan. Polttoaineenvaihdossa vaihtelu on minimaalista, joten muutokset tässä mittauksessa voivat indikoida mahdollista vuotoa laimennuslähteistä. Useilla aikaisemmin käsitellyillä laimennuslähteillä oli rajapinta KBA-järjestelmän kanssa. Boorimittausten epätarkkuuksien vuoksi todellinen boorikoncentraatio varmennetaan laboratorion ottamalla käsinäytteillä määrävälein. Todellisen booripitoisuuden laskiessa alle 1550 ppm aiheutuisi polttoaineenvaihdon keskeytyminen.

TTKE:n mukaan kaikkien kolmen lähdealueen neutronivuodetektorien on oltava käyttökuntoisia polttoaineenvaihdon aikana. Poikkeaminen aiheuttaa välittömän polttoainesiirtojen keskeytymisen lukuun ottamatta polttoaineriippujen tyhjentämistä reaktorista polttoainerakennukseen. Lisäksi keskeytetään kaikki muut toiminnot, jotka voivat aiheuttaa booripitoisuudeltaan alle 1550 ppm pitoisen jäähdytteen pääsyn primääripiiriin. Neutronivuodetektorien käyttökuntoisuuden palauttaminen aloitetaan välittömästi. Johtopäätöksenä todettiin, että toimenpiteiden keskeyttämisellä pystytään varmistamaan alikriittisyys. Mittauksen menetys ei aiheuta alikriittisyyden heikkenemistä, mikäli alikriittisyys oli varmistettu ennen mittauksen menetyksiä. Edellytyksenä on luonnollisesti, että alikriittisyyteen vaikuttavia toimenpiteitä ei suoriteta häiriön aikana. Polttoaineenvaihdon keskeytyksen pituutta ei pystytä arvioimaan.

Dokumenttianalyysin ja havainnoinnin johtopäätöksenä todettiin, että automaation osalta alikriittisyyden varmistamisen ja polttoaineenvaihdon keskeytymisen osalta merkityksellisiä tekijöitä olivat primääripiirin boorimittaus ja lähdealueen neutronivuodetektorien toiminta. Kummassakaan tapauksessa alikriittisyyden heikentymisen vaaraa ei turvallisuusmielessä ole, mikäli aikaisempi tilanne on ollut turvallinen alikriittisyyden suhteen. Molemmissa tapauksissa polttoaineenvaihto keskeytyy tilapäisesti.

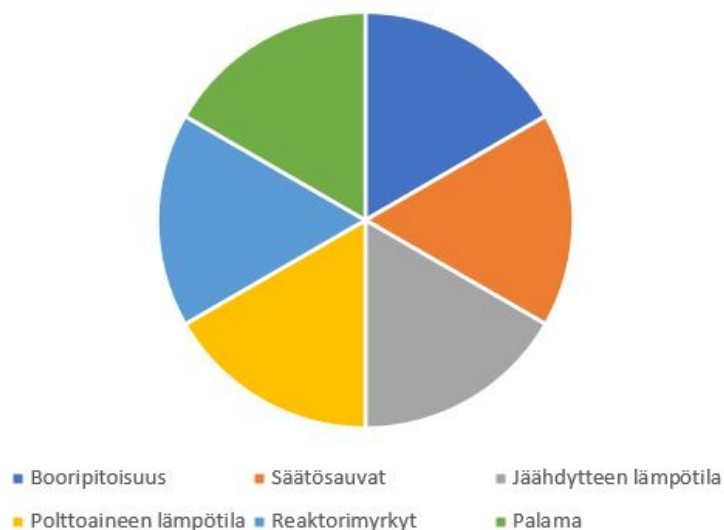
9 Tulokset

Työn tavoitteena oli saada selville alikriittisyyteen vaikuttavat tekijät polttoaineenvaihdossa ja niiden merkityksellisyys. Merkityksellisyydellä tarkoitettiin vaikutusta polttoaineenvaihdon etenemiseen. Tässä luvussa esitetään kehittämistyön tulokset. Tuloksissa käsitellään erikseen alikriittisyyteen vaikuttavat fysikaaliset tekijät, määräaikauskokeet, työvaiheet ja automaatio. Lisäksi tuloksissa käsitellään kehittämissuhteet.

9.1 Alikriittisyyteen vaikuttavat fysikaaliset tekijät

Alikriittisyyteen vaikuttavia fysikaalisia tekijöitä olivat boorikonsentraatio, säätösauvat, jäähdytteen lämpötila, polttoaineen lämpötila, reaktorimyrkyt ja palama. Alikriittisyyteen vaikuttavat tekijät on havainnollistettu kuviossa 12 yhtä suurina palasina, koska niiden keskinäistä merkityksellisyyttä ei ollut mahdollista mitata numeerisesti. Merkityksellisyyden tulokset on esitetty tässä luvussa kirjallisessa muodossa. Merkityksellisyydellä tarkoitettiin polttoaineenvaihdon tilapäistä keskeytymistä, jonka vuoksi vaikutus polttoaineenvaihtoon on havainnollistettu erikseen vielä taulukossa 3.

Alikriittisyyteen vaikuttavat fysikaaliset tekijät



Kuvio 12. Alikriittisyyteen vaikuttavat fysikaaliset tekijät.

Säätösauvat

Kehittämistyön tuloksena todettiin, että alikriittisyyteen vaikuttavista fysikaalisista tekijöistä merkityksellisimpiä olivat boorikonsentraatio ja säätösauvat tässä järjestyksessä. Säätösauvat eivät yksinään riitä varmistamaan alikriittisyyttä ilman riittävää booripitoisuutta ladatussa reaktorisydämessä. Säätösauvojen ollessa oikeissa positioidensa yli kriittisyyttä ei saavuteta reaktorissa laitoksella käytössä olevien järjestelmien aiheuttamilla laimennuksilla, mutta alikriittisyys heikkenee merkittävästi. Polttoaineenvaihdossa säätösauvat olivat polttoaineniipuissa irrotettuna, mutta niiden oikea sijainti reaktorisydämessä on tärkeä alikriittisyyden näkökulmasta. Latausvirheen vaikutuksesta säätösauvat voivat olla väärässä positiossa reaktorisydämessä. Latausvirhe aiheuttaa polttoaineenvaihdon keskeytyksen, joka käsitellään erillisessä kokouksessa. Polttoaineenvaihdon keskeytyksen pituutta on mahdoton arvioida, koska siihen vaikuttaa merkittävästi latausvirheen havaitsemisen ajankohta sekä toimintatapa virheen korjaamiseksi. Lisäksi vaaditaan STUK:n hyväksyntä kokouksessa päätetyille toimenpiteille.

Boorikonsentraatio

Boorikonsentraatio täytyy olla polttoaineenvaihdossa vähintään 1550 ppm ja B10 väkevöintiaste vähintään 30 atomiprosenttia. Booripitoisuuden laskiessa alle 1550 ppm pitoisuuden aiheutuu polttoaineenvaihdon keskeytys. Booripitoisuuden laskiessa alle 1550 ppm täytyy keskeyttää välittömästi reaktorisydämen muutokset, keskeyttää positiivisen reaktiivisuuden lisäykset ja aloittaa toimenpiteet booripitoisuuden palauttamiseksi vähintään 1550 ppm pitoisuuteen. Polttoaineniippujen tyhjentäminen reaktorisydäimestä polttoainerakennukseen on sallittua, koska toimenpiteellä on turvallisuutta parantava vaikutus. B10-väkevöintiasteen ollessa alle 30 atomiprosenttia on aloitettava välittömästi toimenpiteet seisokkibooripitoisuuden kasvattamiseksi 5 prosentilla jokaista yhtä atomiprosenttia kohden, jolla B10-väkevöintiaste alittaa 30 atomiprosenttia. Lisäksi on aloitettava välittömästi toimenpiteet B10-väkevöintiasteen palauttamiseksi vähintään 30 atomiprosentin arvoon. Polttoaineenvaihdon keskeytyksen pituutta alhaisen booripitoisuuden vuoksi on mahdoton tarkalleen arvioida,

mutta toimenpiteisiin booripitoisuuden palauttamiseksi ryhdytään välittömästi. Polttoaineenvaihto voi jatkua, kun boorikonsentraatio on palautettu vähintään 1550 ppm pitoisuuteen. Polttoaineenvaihdon aikana laboratorio ottaa manuaalisesti näytteen booripitoisuudesta 8 tunnin välein, jolloin booripitoisuuden laskeminen edelliseen arvoon verrattuna pitäisi havaita suhteellisen nopeasti. Booripitoisuutta tarkkaillaan myös PICS-järjestelmän avulla digitaalisesti, mutta boorimittauksen oskillointi luo epätarkkuutta mittaukseen.

Käytetyn polttoaineen varastoaltaan boorikonsentraatio on oltava myös vähintään 1550 ppm ja B10-väkevöintiaste vähintään 30 atomiprosenttia, kun polttoainenippuja säilytetään käytetyn polttoaineen varastoaltaassa tai siirretään polttoainenippuja altaassa. Poikkeaminen aiheuttaa polttoainenippujen siirtojen keskeytymisen käytetyn polttoaineen varastoaltaassa. Lisäksi on aloitettava välittömästi toimenpiteet kriteerien palauttamiseksi sallittuihin rajoihin. Polttoaineenvaihtoa voidaan jatkaa, kun edellä mainitut kriteerit toteutuvat.

Jäähdytteen lämpötila

Primäärijäähdytteen tarkoituksena on hidastaa neutronit termiselle alueelle ja mahdollistaa fissio U-235 kanssa. Jäähdytteen lämpötilan nousun aiheuttama reaktiivisuustakaisinkytkentä on positiivinen polttoaineenvaihdossa, koska hidastimen lämpötilakertoimeen vaikuttaa jäähdytteen lämpötilan lisäksi boorikonsentraatio. Polttoaineenvaihdossa korkea boorikonsentraatio aiheuttaa positiivisen takaisinkytkennän. Jäähdytteen lämpötilan vaikutus reaktiivisuuteen on positiivinen polttoaineenvaihtoseisokissa johtuen korkeasta booripitoisuudesta. Jäähdytteen lämpötilan noustessa jäähdytteen tiheys pienenee, jolloin myös neutroneita absorboivien booriatomien määrä pienenee jäähdytteessä. Tuloksena todettiin, että jäähdytteen lämpötilalla ei ole vaikutusta turvallisuusmielessä alikriittisyyteen booripitoisuuden ollessa riittävän korkealla tasolla.

Polttoaineenvaihdossa kaksi jälkilämmönpoistojärjestelmää täytyy olla käyttökuntoisia siirtämään jälkilämpöä mereen primäärijäähdytteestä. Primäärijäähdytteen lämpötila saa olla korkeintaan 55 astetta polttoaineenvaihdon aikana. Poikkeaminen

näistä aiheuttaa käyttörajoitusajan alkamisen välittömästi ja aloitettava toimenpiteet osajärjestelmien käyttökuntauisuuden palauttamiseksi ja jäähdytteen kuuman haaran lämpötilan saamiseksi raja-arvojen sisälle. Polttoaineenvaihtoa voidaan jatkaa, kun edellä mainitut kriteerit toteutuvat.

Käytetyn polttoaineen varastoaltaan lämpötila saa olla enintään 45 astetta, kun säteilytettyjä polttoainenuippuja säilytetään käytetyn polttoaineen varastoaltaassa. Säteilytettyjen polttoainenuippujen siirrot keskeytetään välittömästi, mikäli käytetyn polttoaineen varastoaltaan lämpötila ylittää raja-arvon. Toimenpiteet lämpötilan palauttamiseksi sallittuihin rajoihin aloitetaan välittömästi. Polttoaineenvaihtoa voidaan jatkaa, kun käytetyn polttoaineen varastoaltaan lämpötila on sallituissa rajoissa. Polttoainealtaan lämpötila pysyy sallituissa rajoissa polttoainealtaan jäähdytysjärjestelmän avulla. Säilytettäessä säteilytettyjä polttoainenuippuja käytetyn polttoaineen varastoaltaassa, kahden polttoainealtaan jäähdytysjärjestelmän osajärjestelmän on oltava käyttökuntauisia. Tällä varmistetaan lämpötilan pysyminen sallituissa rajoissa. Poikkeamasta aloitetaan toimenpiteet järjestelmän käyttökuntauisuuden palauttamiseksi välittömästi. Polttoaineenvaihtoa voidaan jatkaa, kun edellä mainitut kriteerit toteutuvat.

Polttoaineen lämpötila

Polttoaineen lämpötilan vaikutus Doppler-ilmiön kautta reaktiivisuuteen alkaa samaan aikaan ydinteknisen lämmityksen alkamisajankohdan kanssa. Tämä tarkoittaa, että polttoaineenvaihdossa Doppler-ilmiötä ei ole. Polttoaineen lämpötilalla on kuitenkin aina vaikutusta reaktiivisuuteen. Polttoaineen lämpötilaa ei ole kuitenkaan mahdollista mitata numeerisilla arvoilla korkean lämpötilan vuoksi, vaan polttoaineenlämpötila muodostetaan laskentaohjelmien avulla. Muutokset polttoaineen lämpötilassa ovat pieniä polttoaineenvaihtoseisokin aikana, joten vaikutukset alikriittisyyteen ovat pieniä. Polttoaineen lämpötilaan vaikuttavat jäähdytteen lämpötila ja virtausnopeudet pidetään polttoaineenvaihdossa tasaisina. Polttoaineen lämpötilan vaikutus alikriittisyyteen on merkittävämpi siirryttäessä täydeltä teholta polttoaineenvaihtoon kuin polttoaineenvaihdon aikana. Alikriittisyyden selvä heikkeneminen vaatisi polttoaineenlämpötilan selkeän alenemisen tai booripitoisuuden alenemisen.

Ensimmäisessä latauksessa polttoaineessa ei ollut myöhemmissä polttoaineenvaihdossa huomioitavaa jälkilämpöä. Polttoaineen lämpötilasta ei suoranaisesti aiheudu polttoainelatauksen keskeytymistä, koska polttoaineen lämpötilan arvo perustuu laskentoihin.

Reaktorimyrkyt

Reaktorimyrkyt absorboivat neutroneita, jolloin reaktiivisuus laskee reaktorimyrkyjen vaikutuksesta. Reaktorimyrkyjä ovat ksenon, samarium ja gadolinium. Tuloksena saatiin, että samarium on merkityksellisempi polttoaineenvaihdossa kuin ksenon. Ksenonilla ei ole minkäänlaista reaktiivisuusvaikutusta polttoaineenvaihdossa, koska ksenon on ehtinyt häviämään reaktorista tultaessa täydeltä teholta polttoaineenvaihtoon. Samarium on pysyvä isotooppi, joka häviää vain absorption kautta. Tästä syystä samariumia muodostuu polttoaineenvaihdon alussa jonkin aikaa, vaikka reaktori on sammutettu. Polttoaineenvaihdon alussa reaktiivisuus laskee eli alikriittisyys paranee. Samariumin merkittävin vaikutus on kuitenkin määriteltäessä kriittistä booripitoisuutta, kun reaktoria käynnistetään polttoaineenvaihdon jälkeen. Gadoliniumia käytetään polttoaineenvaihdossa tuoreissa polttoainenipuissa poistamaan ylijäämäreaktiivisuutta. Gadoliniumin vaikutus häviää ensimmäisen vuoden aikana, joten sillä ei ole merkittävää vaikutusta polttoaineenvaihdossa reaktiivisuuteen. Polttoaineenvaihdossa ainoastaan tuoreet polttoaineniput sisältävät gadoliniumia. Reaktorimyrkyjen osalta tuloksena voidaan todeta, että samariumilla on vaikutusta polttoaineenvaihdon alussa parantaen alikriittisyyttä. Reaktorimyrkyt eivät aiheuta polttoaineenvaihdon keskeytystä.

Palama

Palamalla indikoidaan polttoaineen kulumista. Palamalla ei ole vaikutusta polttoaineenvaihtoon, koska polttoaine on kulutettu loppuun mentäessä polttoaineenvaihtoseisokkiin. Polttoaineenvaihtoseisokkiin mentäessä boorikonsentraatio on laskenut noin 10 ppm pitoisuuteen käyttöjakson aikana. Palaman lukuarvo on tärkeä lasketta-

essa alikriittisyyttä polttoaineenvaihdossa, joten lukuarvona palama on merkityksellinen määriteltäessä alikriittisyyttä. Palama ei aiheuta polttoaineenvaihdon keskeytystä.

Taulukko 3. Alikriittisyyteen vaikuttavat fysikaaliset tekijät ja vaikutus polttoaineenvaihdon keskeytymiseen.

Alikriittisyyteen vaikuttavat fysikaali-	Polttoaineenvaihdon keskeytyminen
Boorikonsentraatio	Kyllä
Säätösauvat	Kyllä
Jäähdytteen lämpötila	Kyllä
Polttoaineen lämpötila	Ei
Reaktorimyrkyt	Ei
Palama	Ei

9.2 Määräaikaiskokeet

Määräaikaiskokeiden käsittelyn osalta todettiin, että Refueling Operation -vuokaavio-ohjeessa suoritetuilla määräaikaiskokeilla ei ole vaikutusta alikriittisyyden heikkenemiseen. Määräaikaiskokeiden todettiin kuitenkin voivan vaikuttaa polttoaineenvaihto-ohjeen etenemiseen. Ennen polttoainelatausta suoritettavat määräaikaiskokeet JNG-112-2, JNG-114-2 ja JND-120-2 olivat JNG- ja JND-järjestelmien toiminnallisia kokeita. Alikriittisyyden heikkenemiseen näillä määräaikaiskokeilla ei ollut vaikutusta, koska järjestelmät ottivat imueden määräaikaiskokeissa 1550 ppm pitoisesta hätäjäähdytysvesialtaasta. Käyttötilassa polttoaineenvaihto primääripiirin jäähdytteen boorikonsentraatio täytyy olla vähintään 1550 ppm. Hätäjäähdytysvesialtaassa on vähintään 1550 ppm pitoista jäähdytettä kaikissa tilanteissa, joka on varmistettu laboratorionäytteellä. Tällä perusteella pystytään luotettavasti osoittamaan, että määräaikaiskokeet eivät heikennä alikriittisyyttä.

Refueling Operation -ohjeen etenemiseen ennen polttoainelatausta suoritettavat määräaikaiskokeet voivat vaikuttaa. Käyttötilassa polttoaineenvaihto täytyy olla TTKE:n mukaan kaksi jälkilämmönpoistojärjestelmää toimintakuntoisia. Osajärjestelmät ovat yksi tai neljä ja kaksi tai kolme. Jälkilämmönpoistojärjestelmässä käytettävä

pumppu on sama, jota käytetään JNG-järjestelmien toiminnallisissa kokeissa. Määräaikaiskokeiden onnistuneella suorituksella on siten merkitystä polttoaineenvaihdossa käytetyn ohjeen etenemiseen. Määräaikaiskokeet täytyy olla suoritettu hyväksytysti, jotta ohjeessa päästään eteenpäin. TTKE:n mukaan käyttötilassa polttoaineenvaihto kahden JND-osajärjestelmän vaaditaan olevan käyttökuntoisia, joiden toiminnallisuus koestetaan määräaikaiskokeessa JND-120-2. Määräaikaiskokeiden hyväksytyt suoritus tukee myös polttoaineenvaihtoprosessin onnistunutta suorittamista siinä vaadittujen järjestelmien käyttökuntauisuuden osalta. Polttoainelatauksen jälkeen Refueling Operation -ohjeessa suoritettiin määräaikaiskokeet FAF-137-4, FAF-135-4, LAR-110-2, JME-110-0, JME-130-4, GHC-120-2, JMA-170-4 ja JMA-180-4. Polttoainelatauksen jälkeen suoritettavilla määräaikaiskokeilla ei todettu olevan vaikutusta alikriittisyyteen. Määräaikaiskokeiden hyväksytyllä suorituksella todettiin olevan vaikutusta ainoastaan laitoksen ylösajon aloittamiseen. Polttoainelatauksen viivästymiseen näillä määräaikaiskokeilla ei todettu olevan yhteyttä, koska ne suoritettiin vasta onnistuneen polttoainelatauksen jälkeen ohjeessa.

Refueling Operation -ohjeessa erotettavien laimennuslähteiden venttiileille ei suoriteta määräaikaiskokeita. Venttiileistä FAL15 AA009, JEB10/20/30/40 AA013 ja JEB10/20/30/40 AA022 olivat moottorikäyttöisiä venttiileitä. Loput olivat käsiventtiileitä, joille määräaikaiskokeen suorittaminen ei ole edes mahdollista.

Tuloksena määräaikaiskokeista todettiin, että polttoaineenvaihdossa suoritettavilla määräaikaiskokeilla ei ole vaikutusta alikriittisyyteen. Määräaikaiskokeet eivät myöskään aiheuta polttoaineenvaihdon keskeytystä missään tilanteessa.

9.3 Työvaiheet

Työvaiheiden tarkastelujen tulokset on jaettu polttoainesiirotiin, alaiden pesuun ja työlupatoimintaan.

Polttoainesiirrot

Polttoainesiirtojen tarkastelujen tuloksena todettiin, että polttoainesiirtojen suorituksen aikana alikriittisyyden heikkenemistä voivat aiheuttaa latausvirhe ja altaiden pinnan lasku. Latausvirheen vaikutusta polttoainelatauksen keskeytymisen pituuteen ei pystytä tarkalleen arvioimaan, koska asian ratkaisemiseksi järjestettäisiin ylimääräinen kokous. Polttoaineenvaihdon keskeytymisen pituuteen ja alikriittisyyden heikkenemisen vakavuuteen vaikuttavat olennaisesti latausvirheen havaitsemisen ajankohta. Alikriittisyyden heikkenemisen vakavuus ja keskeytyksen pituus ovat pienempiä, jos latausvirhe havaitaan aikaisessa vaiheessa. Tuloksena polttoainesiirtojen osalta todettiin, että latausvirheen mahdollisuus on pieni johtuen moninkertaisista varmennuksista. Tuloksena todettiin, että polttoainelatausta suorittavan organisaation toiminta ei aiheuttanut alikriittisyyden heikkenemistä. Laitteistossa oli pieniä teknisiä ongelmia, joilla ei ollut vaikutusta alikriittisyyteen, eikä polttoainelataus viivästynyt merkittävästi. Polttoainelataukseen osallistuvan organisaation toiminta muodostui rutiininomaiseksi ja HU-työkalujen käyttö oli ohjeistuksen mukaista.

Reaktori- ja polttoainealtaiden pinnan lasku alle 18,95 metriin aiheuttaisi polttoainelatauksen tilapäisen keskeytymisen. Käytetyn polttoaineen varastoaltaan pinnan korkeus täytyi TTKE:n mukaan olla vähintään 18,95 metriä aina kun säteilytettyä polttoainetta varastoidaan tai siirretään käytetyn polttoaineen varastoaltaassa. Poikkeaminen aiheuttaa polttoainesiirtojen keskeytymisen ja toimenpiteiden aloittamisen pinnan korkeuden palauttamiseksi sallittuihin rajoihin. Ensimmäisessä latauksessa käytetyn polttoaineen varastoaltaissa oli ainoastaan tuoretta polttoainetta, joten vaatimus ei ollut siltä osin relevantti. Myöhemmissä latauksissa käytetyn polttoaineen varastoaltaassa säilytetään aina osittain säteilytettyjä polttoainepippuja. Lisäksi TTKE:n kaikkia sovellettavia vaatimuksia ja määräyksiä on noudatettava kaikissa käyttötiloissa, joten polttoainesiirrot keskeytyvät tilapäisesti kaikissa tilanteissa altaiden pinnan laskiessa alle raja-arvon. Reaktorialtaan pinnan korkeus täytyy olla vähintään 18,95 metriä käyttötilassa polttoaineenvaihto. Instrumentointielementtien aikana pinnan korkeus täytyy olla tilapäisesti vähintään 19,3 metriä. Pinnan nosto suoritettiin hätäjähdytysvesialtaasta, jolloin alikriittisyys ei heikentynyt toimenpiteen ai-

kana. Reaktorialtaan pinnan lasku raja-arvon alapuolelle aiheuttaa polttoaineenvaihdon tilapäisen keskeytyksen. Altaiden pinnasta johtuvaa polttoainelatauksen keskeytymistä ei havaittu. Tarkastus suoritettiin päiväkirjan historiatiedoista.

Polttoainesiirtojen osalta todettiin tulokseksi, että polttoaineniippujen käsittely suoritettiin hyväksytyllä laitteistolla, tartunta varmistettiin kameralla ennen jokaista nostoa ja polttoainesiirtoja suorittivat vain hyväksytyt henkilöt. Puhelinyhteys reaktorirakennuksen, polttoainerakennuksen ja päävalvomon välillä oli kunnossa. Alikriittisyys oli varmistettu ennen polttoainesiirtojen aloittamista.

Altaiden pesu

Tuloksena altaiden pesun osalta todettiin, että altaiden pesulla ei ollut vaikutusta alikriittisyyteen. Altaiden pesu suoritettiin Refueling Operation -ohjeessa konkreettisen polttoainelatauksen jälkeen. Altaiden pesuun käytetty täyssuolanpoistettu vesi johdettiin osittain primääripiiriin, mutta määrällä ei ollut vaikutusta alikriittisyyteen. Altaiden pesuun käytetty täyssuolanpoistettu vesi johdettiin osittain erilliseen järjestelmään, joka ei vaikuttanut siten primääripiiriin alikriittisyyteen. Altaiden pesun yhteydessä täytettiin lomake täyssuolanpoistetun veden käytöstä vaatimusten mukaisesti. Todellinen pesuun käytetty vesimäärä oli selvästi pienempi kuin arvioitu vesimäärä. Primääripiiriin boorikonsentraatio ei muuttunut pesun vaikutuksesta laboratorion suorittaman analyysin mukaan.

Tuloksena todettiin myös, että tulevaisuudessa reaktorin kantta lasketaan alaspäin altaassa samalla kun reaktorialtaan pintaa lasketaan. Reaktorikansi toimii samalla säteilysuojana. Ensimmäisessä latauksessa oli mahdollista toimia eri tavalla, koska polttoaineniipuissa ei ollut ketjureaktion aiheuttamaa säteilyä. Tuloksena todettiin, että tulevaisuudessa polttoainelatauksissa altaiden pesuvesien vaikutus huomioidaan samalla tavalla kuin ensimmäisessä latauksessa.

Työlupatoiminta

Vuosihuollon aikana työlupakonttori vastaa työlupatoiminnasta ja määrittää työluvan erotus- ja palautustoimenpiteet. Tuloksena todettiin, että työlupatoimintaan liittyy mahdollisuus alikriittisyyden heikkenemisestä polttoaineenvaihtoseisokissa. Merkittävimpänä alikriittisyyden heikkenemiseen vaikuttavana tekijänä todettiin olevan laimennuslähteiden erotus. Laimennuslähteiden erotuksen yhteydessä venttiilit suljetaan ja niihin laitetaan erotuslappu. Erotuslapulla osoitetaan, että venttiilin asentoa ei pysty muuttamaan sekä venttiilin erotuksen mukainen asentotieto. Toiminnassa on inhimillisen virheen mahdollisuus työlupakonttorin toiminnassa sekä venttiilien erotuksen konkreettisesti suorittavien tekijöiden toiminnassa.

Tuloksena kuitenkin todettiin, että työlupatoiminnan toteutuksessa useat eri ihmiset tarkastivat työluvan ennen työluvan konkreettista suoritusta inhimillisten virheiden välttämiseksi. Lisäksi laimennuslähteiden erotus suoritetaan parityöskentelynä, jolloin HU-menetelmän käytöllä pystytään ehkäisemään virheellistä toimintaa työsuorituksen aikana. Näiden lisäksi TTKE:n mukaan laimennuslähteiden erotus pitää tarkistaa paikallisesti kerran viikossa, joka lisää todennäköisyyttä virheellisen toiminnan havaitsemiseen. Mahdollinen virhe toiminnassa havaittaisiin booripitoisuuden alenemisena booripitoisen jäähdytteen laimenemisesta johtuen joko PICS-järjestelmän kautta tai laboratorion suorittaman manuaalisen näytteenoton kautta. Refueling Operation -ohjeessa altaiden pesu suoritettiin ennen laimennuslähteiden erotuksen poistamista, jonka vuoksi altaiden pesuun tarkoitettua venttiilistä poistettiin väliaikaisesti erotus. Toimenpiteellä ei kuitenkaan todettu olevan vaikutusta alikriittisyyden varmistamisen suhteen työlupatoiminnan näkökulmasta.

Työlupatoiminnalla on yleisesti vaikutusta polttoaineenvaihtoon suoritettavien erotusten ja palautusten muodossa. Polttoainelatauksessa käytettävien laitteistojen sähköjen menetyksessä aiheutuu viivettä polttoainelataukseen. Automaatiomittausten menetyksillä voi olla vaikutusta alikriittisyyteen polttoaineenvaihdossa ja aiheutua viivettä polttoainelatauksen etenemiseen. Tuloksena kuitenkin todettiin, että työlupatoiminnan kautta tapahtuva alikriittisyyden heikkeneminen tai polttoainelatauksen viive on epätodennäköinen johtuen useasta varmennuksesta työlupatoiminnassa.

9.4 Automaatio

Tuloksena todettiin, että automaation osalta alikriittisyyden varmistamisen ja polttoaineenvaihdon keskeytymisen osalta merkityksellisiä tekijöitä olivat primääripiirin boorimittaus ja lähdealueen neutronivuodetektorien toiminta. Alikriittisyyden heikentymisen vaaraa kummassakaan tapauksessa ei ole, mikäli automaation menetystä edeltävä tilanne laitoksella on ollut turvallinen alikriittisyyden suhteen.

Primääripiirin todellinen boorikonsentraatio tiedetään polttoaineenvaihdon aikana laboratorion suorittaman näytteen avulla. Näyte otetaan kahdeksan tunnin välein. Boorimittauksen menetys keskeyttää polttoaineenvaihdon, mutta alikriittisyyden heikkenemisen näkökulmasta kahdeksan tunnin aikana ei pääse syntymään turvallisuuksuhkaa laimennuslähteiden kautta automaation menetyksen johdosta.

Lähdealueen neutronivuodetektorien toiminta on tärkeä polttoainelatauksessa. Mittauksen menetys aiheuttaa polttoaineenvaihdon tilapäisen keskeytymisen kaikissa tapauksissa. Mittauksen antama virheellinen signaali aiheuttaa suojarakennuksen evakuoinnin HQNS1 raja-arvosta. Reaktoripikasulku ja hätäboorausjärjestelmän käynnistyminen aiheutuu HQNS2 raja-arvosta, jonka jälkeen siirrytään hätätilanneohjeeseen. Alikriittisyyden heikkenemisen vaaraa ei ole, mikäli alikriittisyys oli ennen mittauksen menetystä kunnossa. Hätäboorausjärjestelmän käynnistyminen lisää alikriittisyyttä, koska 1550 ppm pitoiseen primääripiiriin syötetään 7000 ppm pitoista booria.

9.5 Tulosten yhteenveto

Kehittämistyössä tutkittiin alikriittisyyteen vaikuttavat tekijät. Fysikaalisten tekijöiden osalta tuloksena todettiin, että boorikonsentraatio, säätösauvat ja jäähdytteen lämpötila voivat aiheuttaa polttoaineenvaihdon keskeytyksen, joista boorikonsentraatio ja säätösauvat olivat alikriittisyyden suhteen merkityksellisimpiä. Polttoaineen lämpötilalla, palamalla ja reaktorimyrkyillä ei todettu olevan alikriittisyyttä heikentävää vaikutusta polttoaineenvaihdossa, eikä niiden johdosta aiheudu polttoaineenvaihdon

keskeytymistä. Niiden merkityksen ymmärtäminen alikriittisyyden varmistamisessa on kuitenkin tärkeää.

Muita tutkittavia alikriittisyyteen vaikuttavia tekijöitä olivat määräaikaiskokeet, työvaiheet ja automaatio. Työvaiheet olivat polttoainesiirrot, altaiden pesu ja työlupatoiminta. Käyttötilassa polttoaineenvaihto suoritetuilla määräaikaiskokeilla ei todettu olevan alikriittisyyttä heikentävää vaikutusta. Polttoainelatauksen aikana määräaikaiskokeita ei suoritettu, joten polttoainelatauksen keskeytymistä ei niiden vaikutuksesta tapahdu. Työvaiheista polttoaineensiirroilla oli vaikutusta alikriittisyyteen ja niiden kautta oli mahdollista aiheutua polttoaineenvaihdon keskeytyminen. Reaktori- tai polttoainealaiden pinnan lasku alle sallitun rajan ja latausvirhe olivat merkityksellisimmät tekijät.

Altaiden pesulla ei todettu olevan suurta merkitystä alikriittisyyteen, eikä aiheutuvan polttoaineenvaihdon keskeytymistä. Työlupatoiminnalla todettiin olevan merkitystä alikriittisyyteen ja polttoaineenvaihdon etenemiseen. Merkittävimpänä yksittäisenä tekijänä toiminnassa pidettiin laimennuslähteiden erotusta. Lisäksi virheellinen työlupatoiminta erotusten osalta voi vaikuttaa polttoaineenvaihdon etenemiseen. Automaation osalta alikriittisyyden varmistamisessa tärkeimmät tekijät olivat lähdealueen neutronivuomittaukset ja boorimittaukset. Mittausten menetys aiheutti polttoaineenvaihdon keskeytymisen. Alikriittisyyden suhteen laitos pysyi turvallisena, mikäli mittausten menetystä edeltävä tilanne oli turvallinen ja alikriittisyyteen vaikuttavia muutoksia ei suoritettu mittausten menetyksen aikana. Taulukossa 4 on esitetty kaikki alikriittisyyteen vaikuttavat tekijät ja vaikutus polttoaineenvaihdon etenemiseen.

Taulukko 4. Alikriittisyyteen vaikuttavat tekijät ja vaikutus polttoaineenvaihdon keskeytymiseen.

Alikriittisyyteen vaikuttavat tekijät	Polttoaineenvaihdon keskeytyminen
Boori	Kyllä
Säätösauvat	Kyllä
Jäähdytteen lämpötila	Kyllä
Polttoaineen lämpötila	Ei
Reaktorimyrkyt	Ei
Palama	Ei
Määräaikaiskokeet	Ei
Polttoainesirrot	Kyllä
Altaiden pesu	Ei
Työlupatoiminta	Kyllä
Automaatio	Kyllä

9.6 Kehittämisehdotukset

Tämän kehittämistyön tavoitteena oli saada selville alikriittisyyteen vaikuttavat tekijät ja niiden merkityksellisyys Olkiluoto 3 -ydinvoimalaitoksen polttoaineenvaihtoseisokissa. Tutkimuskysymyksillä selvitettiin operationaaliset riskilähteet alikriittisyyden suhteen todellisessa ympäristössä, joiden avulla pystytään kehittämään menettelyjä, ohjeistuksia ja työtapoja.

Ydinpolttoaineen latausluvan edellytyksenä oli valtioneuvoston myöntämä ydinenergiain vaatimuksen mukainen käyttöluva. Käyttöluvan yhtenä edellytyksenä oli asetettujen turvallisuusvaatimusten edellytysten täyttäminen STUK:n toteamana, minkä perusteella voidaan todeta alikriittisyyden olleen lähtökohtaisesti huomioitu hyvin polttoaineenvaihdon aikana. Merkittävimpänä kehittämiskohteena kehittämistyössä todettiin neutronivuolähteiden normaalin pulssitaajuuden määrittäminen myöhemässä vaiheessa, kun jälkilämpötehoa on riittävästi saatavilla reaktorista luotettavan arvion todentamiseksi. Asiantuntijan arvion mukaan kolmannessa latauksessa pulssitaajuuksien määrittäminen olisi mahdollinen. Määrittämisen jälkeen pystyttäisiin jatkossa latauksen aikana tietämään kulloisenkin tilanteen oikea pulssitaajuus. Menettelytapoja

ja ohjeistuksia muutettaisiin siten, että tietyn polttoaineen nippumäärän jälkeen pulssitaajuus tarkistettaisiin ja verrattaisiin määriteltyyn referenssiarvoon. Lataukset poikkeavat toisistaan, mutta merkittävää vaikutusta pulssitaajuuteen asialla ei ole.

Kehittämisehdotuksena esitetään pohdittavaksi muutosta neutronivuodetektorien laukaisuehtoihin. Kehittämisehdotuksena esitetään, että yhden neutronivuomittauksen vikaantuminen kolmesta aiheuttaisi hälytyksen aiheuttaman toiminnan ainoastaan latauksen alussa polttoaineen ollessa ainoastaan yhdellä sivulla. Polttoaineen ollessa useammalla sivulla reaktorissa hälytykseen vaadittaisiin kaksi virheellistä signaalia. Hälytys JRY03 EY294X XM01, jonka kuvausteksti on SRD FLUX AL aktivoi suojarakennuksen evakuoinnin. Hälytys JRY03 EY909X XD01, jonka kuvausteksti on EBS ACTUATION AL kytkee päälle järjestelmissä aikaisemmin käsitellyn hätäboorausjärjestelmän käynnistymisen. Järjestelmä syöttäisi primääripiiriin noin 7000 ppm -pitoista boorivettä ja signaalin johdosta siirryttäisiin hätätilanneohjeeseen. Tämä viivästyttäisi merkittävästi polttoaineenvaihdon etenemistä, vaikka todellista alikriittisyysongelmaa ei olisi ollut mittauksen vikaantumisen johdosta. Signaalin menettäminen ei aiheuta hälytystä, mutta signaalin piikittäminen raja-arvolle aiheuttaa hälytyksen. Kehittämisehdotusta käsiteltäessä on suoritettava laaja-alaiset turvallisuusanalyysit, jotta turvallisuus pystytään varmistamaan kaikilta osin mahdollisessa muutoksessa.

Polttainelataus suoritettiin ensimmäistä kertaa. Toimintatapoja ja menettelyjä on mahdollista kehittää tulevaisuudessa entistä toimivimmiksi, vaikka alikriittisyyden varmistamisen suhteen ne olivat riittävällä tasolla. Polttoainesiirtolaitteistojen käytön osalta ohjeistuksia on mahdollista kehittää toimivimmiksi tulevaisuudessa, joka parantaa myös alikriittisyyden varmistamista. CCU:n toiminnan kehittäminen luotettavammaksi on tärkeä tekijä, joka lisää varmuuskerrointa alikriittisyyden varmistamisessa. PICS-järjestelmään suositellaan lisäämään myös polttoainerakennuksen osalta käytetyn vesimäärän mittaus. Tällä hetkellä indikointi on ainoastaan suojarakennuksessa ja polttoainerakennuksessa vesimäärä todennetaan ainoastaan letkussa olevan paikallisen mittauksen avulla. Käyttömääräimen osalta kehittämisehdotuksena on, että tulevissa polttainelatauksissa huomioidaan alaiden pesu käyttömääräimessä erillisenä kohtana. Muutoksella saavutetaan etua työlupatoimintaa ajatellen. Seuraa-

vissa polttoainelatauksissa päävalvomossa ei ole erillistä latausvalvojaa. Kehittämisehdotuksena suositellaan määrittämään selkeä menettelytapa latauksen etenemisen varmistamiseksi valvomon osalta CCU:n lisäksi.

10 Pohdinta

OL3-polttoainelataus suoritettiin ensimmäistä kertaa, mikä lisäsi tutkimuksen merkittävyyttä ydinvoima-alalla. Tulosten saaminen tutkimuskysymyksiin edellytti tutkittavan ilmiön lisäksi laitoksen toiminnan ja toimintaympäristön ymmärtämistä. Tämän johdosta tietoperustassa käsiteltiin laitoksen toimintaperiaate sekä polttoaineenvaihdon kannalta keskeinen toimintaympäristö. Kehittämistyön onnistuneen toteutuksen edellytyksenä oli ydinturvallisuuden laaja-alainen ymmärtäminen, minkä vuoksi tietoperustassa käsiteltiin ydinturvallisuuden kannalta polttoaineenvaihtoon keskeisesti liittyvät asiat. Alikriittisyyden sekä alikriittisyyteen vaikuttavien tekijöiden käsittely oli luotettavien tulosten saamisen ehdoton edellytys, minkä vuoksi fysikaaliset ilmiöt käsiteltiin kehittämistyössä. Alikriittisyyden valvonnan yhteydessä käsiteltiin prosessin valvonta, instrumentointi ja ohjeistukset.

Tutkimusmenetelmien huolellinen valinta tuki luotettavien tutkimustulosten saavuttamista. Dokumenttianalyysi oli keskeinen tutkimusmenetelmä, jota käytettiin monipuolisesti kaikissa prosessin vaiheissa. Dokumenttianalyysiä käytettiin myös synteesien muodostamisessa alikriittisyyteen vaikuttavien tekijöiden tarkastelun yhteydessä sekä polttoaineenvaihtoon liittyvien järjestelmien toiminnan vaikutuksien käsittelyn yhteydessä. Dokumenttianalyysin tukena käytettiin havainnointia ja haastattelua, joilla lisättiin luotettavuutta tutkittavasta aiheesta. Polttoaineenvaihto suoritettiin OL3-laitoksella ensimmäistä kertaa, jonka vuoksi monipuolinen havainnointi todellisessa ympäristössä oli keskeisessä asemassa tutkimusta. Asiantuntijahaastattelulla syvennettiin tutkittavan ilmiön kokonaisvaltaista ymmärtämistä. Havainnoinnin yhteydessä suoritettiin epävirallisia keskusteluja työvaiheisiin osallistuvien henkilöiden kanssa, jotka tukivat havainnointia ja dokumenttianalyysin kautta käsiteltyä tietoa. Keskusteluissa henkilöiden oli luontevaa esittää polttoaineenvaihtoon liittyviä näkemyksiä.

Tutkittava aihe oli haastava, mutta erittäin mielenkiintoinen. Kehittämistyön aihe valikoitui työnantajan toivomuksesta aiheen merkityksellisyyden ja ajankohtaisuuden vuoksi, jonka lisäksi suoritettu energia-alan koulutus tuki kehittämistyön aihetta. Prosessi syvensi myös ymmärrystä tutkittavasta asiasta sekä yleistä tietoutta aiheen ympäriltä ydinvoimaan liittyen. Kehittämistyössä haasteeksi nousi epävarmuus polttoainelatauksen aikataulusta, jotta kehittämistyö olisi optimaalisessa vaiheessa polttoainelatauksen alkaessa. Työn aikataulutus onnistui epävarmuudesta huolimatta hyvin. Tutkimuksen haasteeksi nousi myös tutkimuskysymysten kannalta olennaisen tiedon löytäminen ja käsittely suuresta dokumenttimäärästä, jotta laaja aihe käsittelisi vain olennaisia asioita. Kehittämistyön onnistumisen osalta suuri merkitys oli motivaatiolla ja laaja-alaisilla kulkuoikeuksilla laitoksella. Havainnoinnin suorittamisen mahdollisuus kaikkialla laitoksella tiukoista säännöistä ja rajoituksista huolimatta oli onnistumisen yksi edellytys. OL3-laitoksen reaktorisydämen lopputarkastukseen osallistuminen yhdessä IAEA:n, Euratomin ja STUK:n edustajien kanssa koronaviruksen aiheuttamista rajoituksista huolimatta selkeytti käsitystä työnantajan tarjoamasta mahdollisuudesta onnistuneen kehittämistyön toteuttamiseksi.

Tämä kehittämistyö antaa haasteista huolimatta laajan ja kattavan käsityksen alikriittisyyteen vaikuttavista tekijöistä OL3-polttoainelatauksessa sekä polttoaineenvaihdon keskeytyksen aiheuttavista alikriittisyyteen vaikuttavista tekijöistä. Lisäksi tutkittavat asiat ovat tavoitteen mukaisesti luettavissa yhdessä dokumentissa, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi uusien työntekijöiden perehdytyksessä. Kehittämistyö voidaan tarvittaessa kääntää myös englannin kielelle, jolloin tulokset ovat hyödynnettävissä myös kansainvälisesti vastaavanlaisissa laitoksissa. Vastaavanlaisia laitoksia on tekeillä tällä hetkellä Ranskassa ja Britanniassa.

Kehittämistyössä tuloksina saatiin selville alikriittisyyteen vaikuttavat tekijät sekä niiden vaikutus polttoaineenvaihdon keskeytykseen. Keskeytyksien viiveet rajattiin työn ulkopuolelle. Tuloksista havaitaan selkeästi alikriittisyyteen vaikuttavat tekijät, joiden osalta ohjeistuksia ja työmenetelmiä on mahdollista kehittää tulevaisuudessa polttoaineenvaihtoseisokeissa. Ydinvoimalaitoksen latausluvan edellytyksenä on asetettujen turvallisuusvaatimusten täyttäminen STUK:n hyväksymänä, joten tuloksista ei odotettu löytyvän mitään erityisen merkittävää kehityskohdetta alikriittisyyden näkökulmasta.

Aikaisempia tutkimustuloksia ei ollut hyödynnettävissä tutkimuksessa, koska lähes vastaavanlaisen tekniikan omaavan ydinvoimalaitoksen polttoainelataus oli suoritettu aikaisemmin vain Kiinassa. Tuloksiin vaikutti jonkin verran polttoainelatauksen suorittaminen tutkimuksen kohteena olevalle laitokselle ensimmäistä kertaa, koska toimintatavat eivät olleet muodostuneet rutiininomaisiksi vielä ensimmäisessä polttoainelatauksessa. Tutkimuksen tuloksia voidaan pitää luotettavina. Laitostoimittajan toimittamia lähes vastaavanlaisia EPR-tyyppisiä ydinvoimalaitoksia on toiminnassa Kiinassa kaksi kappaletta, joten laitostoimittajan laatimia dokumentteja voidaan siltä osin pitää luotettavina. Ensimmäinen valmistui vuonna 2018 ja toinen vuonna 2019. Lisäksi dokumenttianalyysin luotettavuutta lisättiin monipuolisella havainnoinnilla prosessin eri vaiheissa ja tulkintojen tukena käytettiin asiantuntijahaastattelua. Tutkimusmenetelmiä hyödynnettiin kattavasti useassa eri vaiheessa. Kehittämistyössä nousi esille myös kehittämissuhteita, kuten neutronivuodetektorien laukaisuehtojen muuttaminen polttoaineenvaihdossa tai neutronivuodetektorien pulssitaajuuksien määrittely jälkiteho huomioiden. Kehittämissuhteet tarjoavat mielenkiintoisia ja tarpeellisia jatkotutkimusaiheita sekä työn tilaajan että toteuttajan näkökulmasta. Polttoaineenvaihdon keskeytymisten aiheuttamien taloudellisten vaikutusten tarkastelu on myös mielenkiintoinen jatkotutkimusaihe. Muut esille tulleet kehittämissuhteet ovat toteutettavissa seuraavaan polttoainelataukseen ohjeistuksien ja työmenetelmien kehittämistoimenpiteinä.

Kehittämistyössä noudatettiin hyviä tutkimuskäytänteitä ja rehellisyyden periaatteita kaikissa prosessin vaiheissa. Työ toteutettiin sellaisessa muodossa, että toimeksiantaja on hyväksynyt sen julkiseksi asiakirjaksi.

Lähteet

- Boron Coefficient. Nuclear Power verkkosivu. Viitattu 27.2.2021. <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/nuclear-fission-chain-reaction/reactivity-coefficients-reactivity-feedbacks/boron-coefficient/>.
- Equilibrium Xenon-Stationary Xenon Poisoning. Nuclear Power verkkosivu. Viitattu 27.2.2021. <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/reactor-operation/xenon-135/equilibrium-xenon-stationary-xenon-poisoning/>
- Excure Flux Instrumentation JKT-Equipment Operation and Maintenance Manual D-05.1. 2019. Tekninen dokumentti. Pelli-G/2010/en/1350. Areva SA. Ei julkinen.
- Excure Neutron Flux Instrumentation System-System Description D-02.1. 2018. System description. Tekninen dokumentti. NLE-F DC 28. Areva NP. Ei julkinen.
- Fuel Burnup. Nuclear Power verkkosivu. Viitattu 27.2.2021. <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/reactor-operation/fuel-burnup/>.
- Fuel Temperature Coefficient-Doppler Coefficient. Nuclear Power verkkosivu. Viitattu 27.2.2021. <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/nuclear-fission-chain-reaction/reactivity-coefficients-reactivity-feedbacks/fuel-temperature-coefficient-doppler-coefficient/>
- Hirsjärvi, S., Remes, P., Sajavaara, P. 2007. Tutki ja kirjoita. 13.p. Keuruu: Otavan kirjapaino Oy.
- Kananen, J. 2017. Laadullinen tutkimus pro graduna ja opinnäytetyönä. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu
- Kouhia, V., Kyrki-Rajamäki, R. 2014. Reaktorifysiikan perusteita. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Käyttökäsikirja. 2020. Teollisuuden Voima Oyj. Ei julkinen.
- Käyttömääräin. 2017. Teollisuuden Voima Oyj. Ei julkinen.
- Lowe, M. 2007. Beginning Research. A guide for foundation degree students. Abingdon: by Routledge
- Menettelytapaohje onnistuneen työsuorituksen edellytyksistä. 2019. Teollisuuden Voima Oyj. Ei julkinen.
- Moderator Temperature Coefficient. Nuclear Power verkkosivu. Viitattu 27.2.2021. <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/nuclear-fission-chain-reaction/reactivity-coefficients-reactivity-feedbacks/moderator-temperature-coefficient-mtc/>
- Määräaikaiskokeet. 2019. Teollisuuden Voima Oyj. Ei julkinen.

Määritelmät. Stuklexin verkkosivu. Viitattu 8.1.2021.

<https://www.stuklex.fi/fi/maaritelmat>.

Neutron Poisons-Reactor Poisoning. Nuclear Power verkkosivu. Viitattu 27.2.2021.

<https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/reactor-operation/fuel-burnup/neutron-poisons-reactor-poisoning/>

Samarium-149. Nuclear Power verkkosivu. Viitattu 2.3.2021. <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/reactor-operation/samarium-149/>

OL3-latausuunnitelma. 2019. Teollisuuden Voima Oyj. Ei julkinen.

OL3-suunnitteluperusteet-automaatio. 2018. Teollisuuden Voima Oyj. Ei julkinen.

OL3:n turvallisuustekniset käyttöehdot. 2017. Areva. Ei julkinen.

Ojasalo, K., Moilanen, T., Ritalahti, J. 2014. Kehittämistyön menetelmät. Uudenlaista osaamista liiketoimintaan. 3.p. Helsinki: Sanoma Pro Oy.

Pientehokokeiden suorittaminen. 2019. Teollisuuden Voima Oyj. Ei julkinen.

Phase Commissioning Program for First Core Loading. 2019. Areva. Ei julkinen

Reactor Power Control. Nuclear Power verkkosivu. Viitattu 27.2.2021.

<https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/reactor-operation/normal-operation-reactor-control/reactor-power-control/>

Residual heat calculation. 2005. Framatome ANP. Ei julkinen.

Sandberg, J. 2004. Ydinturvallisuus. Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarja.

Hämeenlinna: Karisto Oy:n kirjapaino.

STUK valvoo. N.d. Säteilyturvakeskuksen verkkosivu. Viitattu 16.1.2021.

<https://www.stuk.fi/stuk-valvoo/stuk-valvoo-sateily-ja-ydinturvallisuutta-suomessa>

System Description Chemical and Volume Control System 30JEW/30KBA/30KBD.

2019. Tekninen dokumentti. NGPS8/2005/en/1001. Areva SA. Ei julkinen.

System Description Demineralized Water Distribution System GHC. 2017. Tekninen

dokumentti. 421 691 535. Siemens PG. Ei julkinen.

Extra Borating System 30JDH. 2019. System description. Tekninen dokumentti.

NFPMS DC 1003. Framatome. Ei julkinen.

System Description Reactor Boron and Water Make-up System 30KBC. 2019.

Tekninen dokumentti. EO MF 2004.517. Areva NP. Ei julkinen.

Safety Injection System, Residual Heat Removal System, In-Containment Refueling

Storage Tank 30JNA-30JND-30JNG-30JNK. 2020. System description. Tekninen

dokumentti. NFPMS DC 1012. Areva SA. Ei julkinen.

Systemés de manutention et levage. 2020. Reel SAS. Ei julkinen.

Sähköntuotanto. Energiateollisuus verkkosivu. Viitattu 19.5.2021.
<https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto>

TVO:n tammi-syyskuu 2020 osavuosisikatsaus.

Tuotanto ja energiatehokkuus. N.d. Teollisuuden Voima Oyj:n verkkosivu. Viitattu 15.1.2021.

<https://www.tvo.fi/vastuullisuus/ymparistojailmastoystavallisyys/ymparistovaikutukset/tuotantojaenergiatehokkuus.html>

TVO-konserni. N.d. Teollisuuden Voima Oyj:n verkkosivu. Viitattu 15.1.2021.

<https://www.tvo.fi/yhtio/hallintojajohtaminen/johtamisjarjestelma.html>

Työtilausjärjestelmän käyttöohje. 2019. Teollisuuden Voima Oyj. Ei julkinen.

Täyssuolanpoistetun veden käyttö boorivettä sisältävissä järjestelmissä. 2021. Teollisuuden Voima Oyj. Ei julkinen.

TXP OM690 for OL3 User Manual. 2009. Siemens PGL. Ei julkinen.

Vilka H. 2005. Tutki ja kehitä. Keuruu: Otavan kirjapaino Oy.

Vilka H. 2007. Tutki ja havainnoi. Vaajakoski: Gummerus Kirjapaino Oy.

Ydinenergi laki 990/1987. Ydinenergi laki. Annettu 11.12.1987. Viitattu 16.1.2021.

<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1987/19870990>

Ydinturvallisuus. N.d. Työ- ja elinkeinoministeriön verkkosivu. Viitattu 16.1.2021.

<https://tem.fi/ydinturvallisuustutkimus>

Ydinvoimalaitokset. Säteilyturvakeskuksen verkkosivu. Viitattu 17.1.2021.

<https://www.stuk.fi/aiheet/ydinvoimalaitokset/turvallisuusperiaatteet/syvyysuuntainen-turvallisuusajattelu>

Ydinsähköä Olkiluodosta. 2012. Teollisuuden Voima Oyj.

Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3. 2014. Teollisuuden Voima Oyj.

Liitteet

Liite 1. Teemahaastattelurunko

- 1) Polttoaineen lämpötilan vaikutus alikriittisyyteen polttoaineenvaihdossa
- 2) Jäähdytteen lämpötilan vaikutus alikriittisyyteen polttoaineenvaihdossa
- 3) Boorikonsentraation vaikutus alikriittisyyteen polttoaineenvaihdossa
- 4) Reaktorimyrkkyjen vaikutus alikriittisyyteen polttoaineenvaihdossa
- 5) Palaman vaikutus alikriittisyyteen polttoaineenvaihdossa
- 6) Säätosauvojen vaikutus alikriittisyyteen polttoaineenvaihdossa
- 7) Alikriittisyyden heikkenemiseen vaikuttavat tekijät polttoaineenvaihdossa
- 8) Käytössä olevat HU-työkalut alikriittisyyden varmistamisen suhteen polttoaineenvaihdossa
- 9) Altaiden pesun vaikutus alikriittisyyteen polttoaineenvaihdossa
- 10) Polttoainesiirtoprosessin riskit alikriittisyyden näkökulmasta
- 11) Alikriittisyyden valvontaan liittyvät riskit polttoaineenvaihdossa
- 12) Alikriittisyyden varmistamiseen liittyvät kehitysehdotukset polttoaineenvaihdossa

Liite 4 Täyssuolanpoistetun veden käyttölomake

TÄYSSUOLANPOISTETUN VEDEN KÄYTTÖ -LOMAKE**PERUSTIEDOT**

PVM:
TYÖMÄÄRÄIN/TESTAUSLUPA:
TYÖN/TESTIN SISÄLLÖN LYHYT KUVAUS:

ENNEN TYÖN SUORITTAMISTA

ARVIOITU KÄYTETTÄVÄ VESIMÄÄRÄ:
ALKUPERÄINEN BOORIPITOISUUS:
ALKUPERÄISEEN BOORIPITOISUUTEEN KOHDISTUVIEN LAIMENNUSVAIKUTUSTEN LASKENTA ARVIOIDUN VESIMÄÄRÄN PERUSTEELLA:

TYÖN SUORITTAMISEN JÄLKEEN

MITATTU KÄYTETTY VESIMÄÄRÄ:
ALKUPERÄISEEN BOORIPITOISUUTEEN KOHDISTUVIEN LAIMENNUSVAIKUTUSTEN LASKENTA MITATUN KÄYTETYN VESIMÄÄRÄN PERUSTEELLA:

NÄYTTEEN ANALYYSIN JÄLKEEN

LOPULLINEN BOORIPITOISUUS LABORATORIONÄYTTEEN PERUSTEELLA:

PÄIVÄYS JA ALLEKIRJOITUS: