KÄYTTÖTILANEHTOJEN MÄÄRITTELEMISEN PERUSTEET YDINVOIMA-LAITOKSEN LAITOSTIETOKANNASSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2024

Tinja Sandberg

Tarkastaja: TkT Elina Hujala

Ohjaaja: TkT Elina Hujala

DI Timo Hiltunen, Fortum Power and Heat Oy

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikka

Tinja Sandberg

Käyttötilanehtojen määrittelemisen perusteet ydinvoimalaitoksen laitostietokannassa

Energiatekniikan kandidaatintyö

2024

47 sivua, 5 kuvaa ja 2 taulukkoa

Ohjaajat: TkT Elina Hujala ja DI Timo Hiltunen

Tarkastaja: TkT Elina Hujala

Avainsanat: Loviisan voimalaitos, turvallisuustekniset käyttöehdot, käyttötila, turvallisuusjärjestelmä

Tässä kandidaatintyössä perehdytään ydinvoimalaitoksen käyttötilanvaihtoihin ja turvallisuusjärjestelmien kunnossaolovaatimuksiin ylösajossa. Työssä luodaan perusteet, joiden avulla turvallisuusteknisten käyttöehtojen alaisten järjestelmien käyttöpaikoille voidaan määritellä käyttötilanehdot laitostietokannassa. Työn tarkoituksena on selvittää, mitä käyttötilanehtojen määrittelyssä tulee huomioida ja millä perusteilla käyttötilanehto määritellään. Lisäksi työssä selvitetään, tarvitseeko laitostietokantaan määriteltyjä käyttötilanehtoja kehittää uusien perusteiden mukaiseksi. Käyttötilanehtojen määrittelyllä pyritään vähentämään manuaalista työtä ylösajotarkastuksissa. Lisäksi ajankohtaista tietoa saadaan välitettyä laitostietokannan kautta koko organisaatiolle jolloin resurssit voidaan kohdentaa tehokkaammin kriittisiin töihin.

Työssä perehdytään käyttötilojen rajaparametrien fysikaalisiin perusteisiin sekä viranomaisten asettamiin ohjeistuksiin ja lakeihin. Näiden pohjalta käsitellään järjestelmiin kohdistuvia vaatimuksia. Työssä tutkitaan kolmea turvallisuusjärjestelmää, joiden kunnossaolovaatimukset eroavat eri käyttötiloissa.

Työssä luodaan perusteet käyttötilanehtojen määrittämiseen ydinvoimalaitoksen laitostietokannan käyttöpaikoilla. Lisäksi työssä pohditaan käyttötilanehtojen tarkentamista. Työn tutkimustuloksena syntyneitä perusteita tulee tarkentaa, mikäli työn pohjalta tehtävässä käyttötilanehtojen määrittelyprosessissa ilmenee sellaisia yksityiskohtia, joita perusteet eivät ota huomioon. Työn jatkotutkimuksen aiheita ovat käyttötilanehtojen määritteleminen ennakkohuolloille, laitosyksiköiden yhteisille järjestelmille sekä käyttötilanehtojen merkitys laitoksen alasajossa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Tinja Sandberg

The basics of defining the criteria for mode entry requirements in the nuclear power plant's database

Bachelor's thesis

2024

47 pages, 5 figures and 2 tables

Supervisors: D.Sc. (Tech) Elina Hujala and M.Sc. Timo Hiltunen

Examiner: D.Sc. (Tech) Elina Hujala

Keywords: Loviisa's nuclear power plant, operational limits and conditions, operational modes, safety system

This Bachelor's thesis focuses on the changes of the operational modes in a nuclear power plant and the safety systems maintenance requirements during the start-up from a shutdown phase. The thesis will create a criteria for defining the mode entry requirements (MER) for the operating locations in the plant's data-base. The safety systems under the operational limits and conditions will be specified with MERs. The purpose of this thesis is to find out what must be taken into account when defining a system's MER and on what grounds the MERs of power production mode are defined. This thesis will additionally examine whether the MERs in the plants data-base need to be developed to comply with the new criteria. The purpose of defining the MERs is to reduce manual work phases during the start-up's check-ups. The updated information can additionally be distributed to the whole organization and its resources can be allocated more efficiently to the critical stages of the operations.

The thesis explores the operational modes' physical bases of the boundary parameters as well as guidelines and laws by the authorities. Based on these, the requirements for the systems are processed. The thesis investigates three safety systems with different maintenance requirements in different operational modes.

The thesis will establish the criteria for determining the MERs at the nuclear power plant's databases operating locations. In addition the thesis will consider specifying the MERs. The criteria created in this thesis should be specified if details that criteria don't take into account are found later in the defining process. The topics of further research include defining the MERs for preventive maintenance, the common systems of the plant units and importance of the MERs during plant's shutdown.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

k	kasvutekijä
n	neutronien määrä
p	neutronikaappauksen välttämisen todennäköisyys resonanssialueella
P	vuodonvälttämistodennäköisyys

Kreikkalaiset

ε	nopean fission tekijä
f	terminen käyttösuhde
η	neutronien tuottotekijä
ρ	reaktiivisuus

Alaindeksit

eff	efektiivinen
n	nopea neutroni
t	terminen neutroni
∞	ääretön

Lyhenteet

IAEA	International Atomic Energy Agency
KUU	Kuumaseisokki
KUV	Kuumavalmius
KYL	Kylmäseisokki
KÄT	Käynnistystila
KÄY	Tehokäyttö

LAT	Latausseisokki
LOMAX	Loviisa Maximo Asset Management
MER	Mode Entry Requirement - Käyttötilanehto
OLC	Operational limits and conditions – Turvallisuustekniset käyttöehdot
POP	Latausseisokin erityisvaihe, jossa polttoaine on poistettu reaktorista
STUK	Säteilyturvakeskus
TTKE	Turvallisuustekniset käyttöehdot
VVER	Vodo-vodjanoi energetitšeski reaktor - Painevesireaktorityyppi

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto ... 8
1.1 Taustaa ... 8
1.2 Tutkimusongelma ja työn rakenne ... 9
1.3 Työn rajaukset ja viitekehys ... 11
2 Reaktorin fysikaalinen toiminta ... 13
2.1 Reaktiot ydinreaktorissa ... 13
2.2 Reaktorin kriittisyys ja kasvutekijä ... 16
2.3 Reaktiivisuus ... 17
2.4 Neutronitasapaino ja reaktorin tehon säätö ... 18
2.5 Jälkilämpö ... 20
3 Käyttötilojen vaatimuspohja ... 21
3.1 Turvallisuusperiaatteet ... 21
3.2 Turvallisuustekniset käyttöehdot ... 22
3.3 Turvallisuusteknisten käyttöehtojen sisältö ... 24
3.3.1 Käyttörajoitukset ... 24
3.3.2 Määräaikaiskoestukset ... 25
3.3.3 Ennakkohuollot ... 26
3.4 Turvallisuuden todentaminen ... 26
4 Käyttötilat Loviisan voimalaitoksella ... 28
4.1 Seisokkitilat ... 29
4.2 Käyntitilat ... 30
4.3 Käyttötilan vaihtaminen ... 30
5 Käyttötilanehtojen määritteleminen ... 32
5.1 Esimerkkijärjestelmät ... 32
5.1.1 Suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmä ... 33
5.1.2 Hätädieselgeneraattorit ... 34

5.1.3 Laitossuojausjärjestelmä 35
6 Perusteet käyttötilanehtojen määrittelemiseen käyttöpaikalla 36
6.1 Perusteet käyttötilanehtojen määrittelemiseen järjestelmälle, jolla ei ole vaatimuksia kaikissa käyttötiloissa 37
6.2 Perusteet käyttötilanehtojen määrittelemiseen järjestelmälle, jolla on vaatimuksia jokaisessa käyttötilassa: 37
6.3 Käyttötilanehtojen tarkentaminen 38
6.4 Esimerkkijärjestelmien käyttötilanehdot 39
7 Johtopäätökset 41
8 Yhteenveto 43
Lähteet 45

1 Johdanto

Tämä kandidaatintyö käsittelee käyttötilanehtojen määrittelemisen perusteita ydinvoimalaitoksen laitostietokannassa. Työn toimeksiantaja on Fortum Power and Heat Oy:n ydinturvallisuusyksikkö. Työssä käsitellään käyttötilanehtojen määrittelemistä laitoksen käyttöpaikoille. Lisäksi työssä luodaan perusteet käyttöpaikkojen käyttötilanehtojen määrittelemiselle laitostietokannassa.

Ydinvoimalaitoksen käyttötilat ovat laitoksen toiminnan tiloja, joille on määritelty tietyt reunaehdot. Ne kattavat kaikki laitoksen normaalin toiminnan tilat tehokäytöstä seisokkiin. (Fortum, 2023) Kunkin käyttötilan vaatimukset riippuvat primääripiirin tilasta. Laitoksen käyttötiloja tarvitaan, kun reaktori sammutetaan eli ajetaan alas ja ydinreaktio pysäytetään seisokkia varten. (Fortum, 2024a)

Laitoksen turvallisuusjärjestelmien tulee täyttää niille määritellyt toimintavaatimukset jokaisessa kuudessa käyttötilassa. Vaatimusten täyttymistä seurataan ja järjestelmien käyttökuntoisuus tarkastetaan aina käyttötilanvaihdon yhteydessä. (Fortum, 2024a) Ylösajon etenemisen edellytyksenä on, että turvallisuusjärjestelmät täyttävät niille asetetut vaatimukset. Nämä kiristyvät pääsääntöisesti käyttötiloittain tehokäyttöä kohti siirryttäessä.

Laitoksella toteutetaan kerran vuodessa etukäteen suunniteltu vuosihuoltoseisokki. Vuosihuollon aikana laitoksen järjestelmiä huolletaan ja reaktorin polttoainetta vaihdetaan. Samaan tapaan kuin alasajossa, käyttötiloja tarvitaan, kun laitos ajetaan ylös seisokin jälkeen. (Fortum, 2024a) Tässä työssä keskitytään käyttötilanehtojen määrittämiseen laitoksen ylösajossa.

1.1 Taustaa

Ydinenergian tuotanto on tiukasti säännösteltyä. Maailmanlaajuisesti ydinenergian turvallista ja rauhanmukaista käyttöä edistää International Atomic Energy Agency (IAEA). IAEA kehittää kansainvälisiä ydinturvallisuussäädöksiä ja -suosituksia. IAEA:n säädökset on jaoteltu neljään eri luokkaan: perustavoitteet (Safety Fundamentals), turvallisuusvaatimukset (Safety Requirements), turvallisuusohjeet (Safety Guide) sekä hyvät käytänteet (Safety

Reports). IAEA:n turvallisuusohjeistossa on määritelty säädökset ydinvoimalaitoksen Turvallisuusteknisten käyttöehtojen (TTKE) sisällölle (OLC, Operational Limits and Conditions). (Koutaniemi et al., 2004)

Suomessa ydinenergian käytön säädökset perustuvat ydinenergialakiin (L 1987/990) sekä lakiin pohjautuvaan ydinenergia-asetukseen (YEA 161/1988). Ydinenergiantuotantoa valvovat tahot ovat Säteilyturvakeskus (STUK) sekä Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM). Valvonnalla, laeilla ja ohjeistuksilla halutaan taata, että ydinenergian käyttö on yhteiskunnan kokonaisedun mukaista, turvallista ihmisille sekä ympäristölle eikä sen käyttö mahdollista ydinaseiden leviämistä. (TEM, n.d.)

IAEA:n ohjeistukset toimivat perusteena Suomen ydinenergialainsäädännölle ja säännöksille. Ydinenergialain ja ydinenergia-asetuksen pohjalta STUK on antanut määräyksiä ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta, turvallisuusjärjestelyistä sekä ydinjätteen loppusijoituksesta (Y/1-5/2018). Yhdessä lain, ydinenergia-asetuksen ja STUK:n määräyksien sekä IAEA:n ohjeistusten pohjalta STUK on valmistellut ja asettanut ydinturvallisuus (YVL) -ohjeet. (Inkinen, 2023)

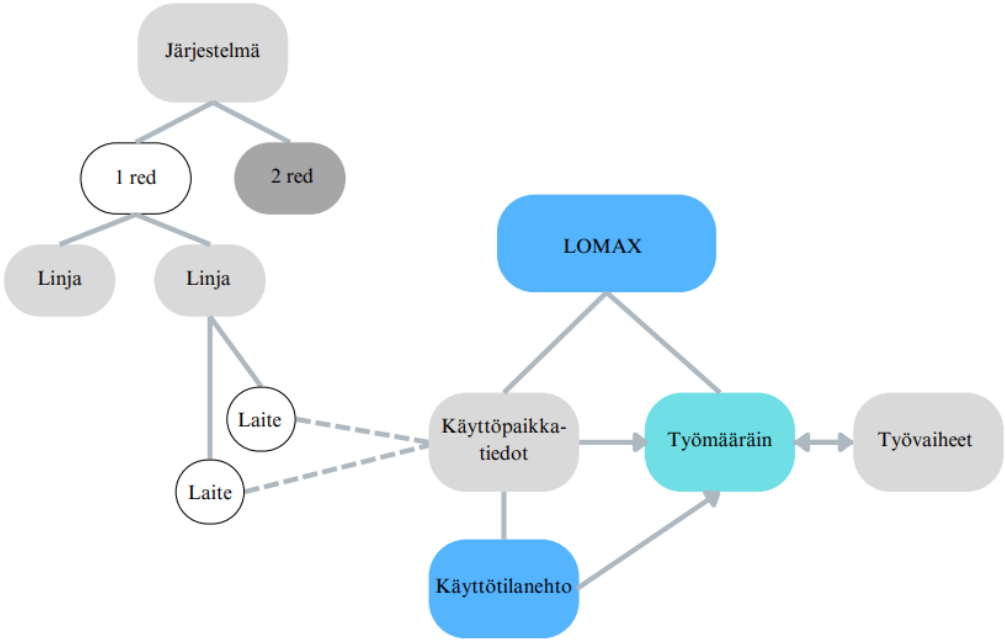
YVL-ohjeissa ja IAEA:n ohjeistossa asetetaan vaatimuksia TTKE:n sisällölle ja rakenteelle. TTKE on ydinvoimalaitoksen lisensiointiasiakirja, joka vaaditaan sen käyttöluvan hakemisessa. TTKE määrittää vaatimukset laitoksen turvalliseen käyttöön. Asiakirjassa määritellään rajoitus- ja suojausjärjestelmien raja-arvot laitoksen eri käyttötiloihin. Lisäksi TTKE:ssa esitetään vaatimukset laitoksen turvallisuusjärjestelmille ja niiden toiminnan todentamiselle sekä seuraamiselle. (YVL A.6)

1.2 Tutkimusongelma ja työn rakenne

Kaikkia Loviisan ydinvoimalaitoksella tehtäviä töitä hallinnoidaan laitostietokanta LOMAX:n avulla. Se on toiminnanohjausjärjestelmä, jonka kautta seurataan käynnissä olevia töitä sekä niiden vaiheita. LOMAX:sta löytyvät tiedot mm. laitoksen laitteista, niiden käyttö- ja kunnossapitovaatimuksista sekä käyttöpaikoista. Laitoksen työt suoritetaan toiminnanohjausjärjestelmän kautta annettujen työmääräinten avulla. Työmääräimet sisältävät tarkat tiedot työstä vaiheineen, työn vastuuhenkilöt sekä työkohteen eli käyttöpaikan, jolla

työ suoritetaan. Avoimet työmääräimet ovat aloitettuja keskeneräisiä töitä. (LOMAX, 2024)

LOMAX:ssa käyttöpaikoille on mahdollista määrittää käyttötilanehto. Tieto kertoo mihin käyttötilaan siirryttäessä käyttöpaikan on oltava käyttökunnossa. Mikäli tieto on lisätty käyttöpaikalle, se näkyy automaattisesti kyseiselle käyttöpaikalle kohdistuvilla työmääräimillä. Käyttötilanehto on merkintä, joka helpottaa töiden ajoituksen priorisointia ylösajossa. Tällöin LOMAX:sta nähdään suoraan avoimena olevat työmääräimet, jotka ovat esteenä käyttötilan vaihdolle. (LOMAX, 2024)



Kuva 1. Käyttötilanehto LOMAX:ssa (LOMAX, 2024 mukaillen)

Tällä hetkellä käyttötilanvaihdon esteenä olevia töitä etsitään ylösajotarkastuksissa. Turvallisuusinsinööri käy tietojärjestelmästä yksittäin läpi avoimena olevat työmääräimet ja etsii niiden joukosta priorisoitavat työt. Tämä on aikaa vievä työnvaihe, jonka helpottamiseksi laitostietokannankäyttöpaikoille halutaan määrittää käyttötilanehdot.

Käyttötilanehto-tieto on jo lisätty osalle käyttöpaikoista. Tietoa ei ole kuitenkaan määritetty suurimmalle osalle käyttöpaikoista. Lisäksi jo lisätyissä tiedoissa on virheitä ja eroavaisuuksia esimerkiksi järjestelmien eri linjojen välillä. (LOMAX, 2024)

Tutkimusongelmaksi muodostuu perusteiden luominen käyttötilanehtojen määrittämiselle laitoksen käyttöpaikoilla. Tarkoituksena on selvittää käyttötilanehtoa määrittäessä huomioitavat seikat, joiden pohjalta voidaan luoda kaikille TTKE:n alaisten turvallisuusjärjestelmien käyttöpaikoille pätevä ohjeistus. Työssä on tarkoitus kehittää perusteet, joiden avulla käydään aikaisemmin lisätyt käyttötilanehdot läpi. Virheelliset ehdot korjataan työn perusteiden mukaiseksi.

Työn tutkimuskysymyksiksi muodostuivat: Mitä käyttötilanehtoa määrittäessä tulee huomioida ja millä perusteilla käyttötilanehto määritetään? Lisäksi tarkoituksena on selvittää tarvitseeko laitostietokantaan määriteltyjä käyttötilanehtoja kehittää uusien perusteiden mukaiseksi.

Työssä tutkitaan kolmea laitoksen turvallisuusjärjestelmää sekä niiden TTKE- vaatimuksia ja käyttötarkoituksia. Käyttötilanehdon määrittämiseksi täytyy ymmärtää järjestelmän toimintaperiaate, mitä vaatimuksia sen toiminnalla on fysikaalisella tasolla ja mitä siltä vaaditaan missäkin käyttötilassa.

Työn tekeminen aloitettiin perehtymällä käyttötilojen raja-arvojen fysikaalisiin perusteisiin Tällä pyrittiin ymmärtämään yhteneväisyyksiä reaktorin tilan ja käyttötilojen välillä. Lisäksi reaktorin toiminnan ymmärtämisestä on apua kansallisten ja kansainvälisten ohjeistusten tarkastelussa. Työn toisessa luvussa käsitellään reaktorin toimintaa ylösajon ja seisokin näkökulmista. Kolmannessa luvussa perehdytään ydinvoiman käyttöön kohdistuviin viranomaisvaatimuksiin ja turvallisuusteknisiin käyttöehtoihin.

Loviisan voimalaitoksen käyttötilat ja niiden vaatimukset esitellään neljännessä luvussa. Lisäksi luvussa käsitellään käyttötilan vaihtoa ylösajossa. Viidennessä luvussa perehdytään työn tutkimuksen pohjana toimiviin esimerkkijärjestelmiin. Kuudennessa luvussa esitellään esimerkkijärjestelmien avulla luodut perusteet käyttötilanehtojen määrittelemiselle. Työn seitsemännessä luvussa arvioidaan syntyneitä perusteita sekä tehdään johtopäätöksiä esimerkkijärjestelmien pohjalta. Viimeisessä luvussa tehdään yhteenveto työstä.

1.3 Työn rajaukset ja viitekehys

Tutkimuskysymys on muotoiltu vastaamaan toimeksiantajan tarpeeseen ja siksi työssä keskitytään käyttötilanehtojen määrittämiseen juuri Loviisan voimalaitoksella.

Käyttötilanehtojen määrittelemisen perusteita ei voida käyttää suoraan muilla laitoksilla, sillä niiden käyttöpaikat ja järjestelmät eivät ole identtisiä. Lisäksi laitosten työmääräinkäytäntö ja ylösajotoimenpiteet eroavat, joten työn tulos ei välttämättä vastaa muiden laitoksien tarpeita. Ydinvoimalaitosten suunnittelun turvallisuusperiaatteet ovat kuitenkin samat ja perustuvat yhteisiin ohjeisiin. Tästä syystä työssä syntyviä perusteita voidaan soveltaa ja kehittää myös muiden laitoksien käytänteisiin sopivaksi.

Työssä ei käsitellä käyttötilanehtojen merkitystä laitoksen alasajossa. Työtä on rajattu siten, että sen pohjalta syntyvä ohjeistus on viitteellinen ja sitä on mahdollista jatkokehittää tarpeen mukaan. Tuloksena halutaan perusteet, joiden pohjalta erilaisia vaatimuksia omaavat järjestelmät saavat käyttötilanehdot yhtenevillä periaatteilla. Työssä tarkastellaan kolmea erilaista esimerkkijärjestelmää, jotta tutkimuksen laajuus pysyisi kohtuullisena ja kandidaatintyön rajoissa. Tutkimuksen kohteeksi on valittu järjestelmiä, joiden kunnossaolovaatimukset eroavat. Esimerkkijärjestelmät on valittu siten, että tutkimusaineistosta saataisiin mahdollisimman laaja työn rajausten sisällä. Rajatusta tutkimusaineistosta johtuen työn tuloksena syntyviä perusteita voi olla tarpeen täydentää sitä mukaa, kun uusille järjestelmille saadaan lisättyä käyttötilanehto. Tällöin perusteita tulee tarkentaa siten, että ne kattavat esiin nousseen määrittelyprosessiin vaikuttavan seikan.

Käyttötilanehtoja määritellään laitoksen normaalia käyttöä varten. Työssä ei käsitellä häiriö-, hätä- tai onnettomuustilanteita varten luotuja ohjeistuksia. Työstä on rajattu pois ennakkohuoltojen käsittely, eikä työssä perehdytä laitosyksiköiden järjestelmien välisiin eroavaisuuksiin. Työn aiheen ulkopuolelle rajautuvat myös järjestelmät, jotka ovat yhteisiä molemmilla voimalaitosyksiköillä. Tämä johtuu siitä, että vuosihuollot suunnitellaan toteutettavaksi eri aikaan. Mikäli turvallisuusjärjestelmä on yhteinen, siihen kohdistuvat vaatimukset määräytyvät tiukemman, eli yleensä käytössä olevan laitosyksikön vaatimusten mukaan. Tästä syystä yhteisen järjestelmän käyttötilanehdon määrittely ei hyödytä seisokissa olevan laitosyksikön ylösajotoimenpiteitä.

2 Reaktorin fysikaalinen toiminta

Loviisan voimalaitos koostuu kahdesta yksiköstä: LO1 ja LO2. Molempien yksiköiden reaktorit ovat venäläisiä VVER-440 painevesireaktoreita. Laitoksissa on kaksi kiertopiiriä: primääri- ja sekundääripiiri. Primääripiirissä kiertää reaktorin moderaattorina eli hidastimena toimiva vesi. Vettä kierrätetään reaktorin ja höyrystimen välillä, jolloin reaktorissa syntynyt lämpö saadaan siirrettyä höyrystimelle. Vesi ei kuitenkaan kiehu primääripiirissä vallitsevan korkean paineen ansiosta. Lämpö siirtyy höyrystimessä matalapaineiseen sekundääripiiriin, jossa kiertävä vesi höyrystyy. Vesihöyry johdetaan turbiineille, jotka pyörittävät generaattoreita. Turbiinin jälkeen höyry johdetaan lauhduttimeen, jossa se lauhtuu takaisin vedeksi. (Fortum, 2022)

Loviisan reaktorit ovat termisiä painevesireaktoreita. Reaktorin toiminta perustuu uraanin hajoamissarjaan ja termisiin eli hidastettuihin neutroneihin. Suurin osa luonnossa esiintyvästä uraanista on ^{238}U-isotooppia. Reaktorin polttoaineena käytetään luonnon uraanista ^{235}U-isotoopin suhteen väkevöityä uraanidioksidia UO_2 (WNA, 2021) Laitoksen ylösajossa reaktori käynnistyy, kun siellä vallitsevat olosuhteet ovat otolliset ydinreaktiolle. Seuraavaksi työssä tarkastellaan ydinreaktorin toimintaa sekä reaktorissa tapahtuvia fissioreaktioita. Reaktioita sekä niihin vaikuttavia tekijöitä tarkastellaan VVER-440 reaktorin toiminnan kannalta.

2.1 Reaktiot ydinreaktorissa

Fissio on ydinreaktio, jossa raskas atomin ydin hajoaa kahdeksi kevyemmäksi tytärytimeksi. Reaktio voi tapahtua spontaanisti tai neutronin vuorovaikutuksen seurauksena. Spontaanissa fissiossa polttoaineen ydin halkeaa itsestään. Reaktio on harvinainen, sillä haljetakseen ytimen energian täytyy olla suurempi kuin fission kynnysenergia. (Andrews & Jelley, 2013)

Spontaania fissiota todennäköisempi reaktio on neutronikaappauksen seurauksena syntyvä fissio. Polttoaineessa ^{235}U-isotoopin ydin halkeaa, kun siihen osuu hidastettu eli terminen neutroni. Ensin ydin kaappaa neutronin, jolloin siitä muodostuu virittynyt ^{236}U-isotooppi. (Andrews & Jelley, 2013) Virittyneessä tilassa olevan nuklidin energia ylittää fission

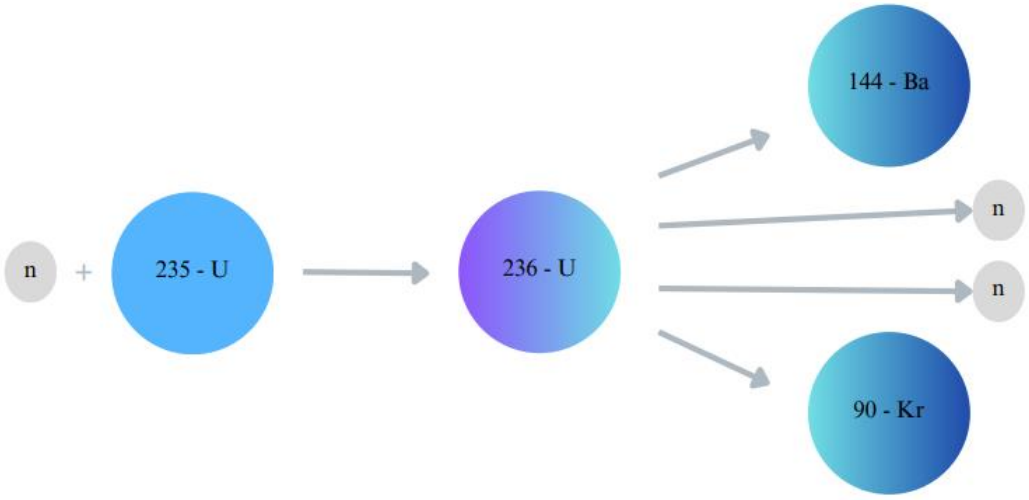
kynnysenergian. Isotooppi halkeaa pyrkiessään tasapainotilaan, jolloin sen viritystila purkautuu. Fissiossa syntyy kaksi kevyempää tytärydintä ja tyypillisesti 1-3 neutronia. Lisäksi reaktiossa vapautuu gamma- ja neutronisäteilyä sekä ytimen koossa pitänyttä sidosenergiaa. Energia muuntuu halkeamistuotteiden liike-energiaksi ja vapautuu lämpönä. Osa syntyvistä fissiotuotteista jää epästabiiliin muotoon virittyneeseen tilaan, mikä purkautuu radioaktiivisena säteilynä. (Marttila et al., 1971) Fissiotuotteet hajoavat radioaktiivisesti, kunnes ne saavuttavat stabiilin muodon. (Andrews & Jelley, 2013) Uraanin fissiossa voi syntyä useita eri nuklideja, kuten bariumia, kryptonia, strontiumia, cesiumia, jodia ja ksenonia. Bariumia ja kryptonia syntyy esimerkiksi seuraavilla tavoilla. (WNA, 2024)

$$^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{236}_{92}\mathrm{U}^{*} \rightarrow {}^{144}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{90}_{36}\mathrm{Kr} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

$$^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{236}_{92}\mathrm{U}^{*} \rightarrow {}^{141}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{92}_{36}\mathrm{Kr} + 3\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

Fissioreaktiossa syntyvät neutronit ovat nopeita. Nopealla neutronilla on termistä neutronia suurempi kineettinen energia. Sen vuorovaikutus ytimen kanssa riittää käynnistämään fissioreaktion myös uraanin ^{238}U-isotoopilla. Kyseisen isotoopin reaktion kynnysenergia ei ylity termisen neutronin törmäyksen avulla. (Eurasto et al., 2004)

Termisessä reaktorissa fissio tapahtuu hidastetulla energia-alueella termisien neutronien avulla. Fissioreaktiossa syntyvät neutronit aiheuttavat uusia reaktioita osuessaan fissiileihin ytimiin. Fissiili nuklidi voi fissioitua termisen neutronin törmäyksessä. Tämä ylläpitää reaktorin ketjureaktiota, niin kauan kuin uusia neutroneja ja fissiilejä ytimiä on käytettävissä. Ketjureaktion teho pysyy tasaisena, kun fissiossa syntyvät neutronit aloittavat yhden uuden ketjureaktion. Jos neutronien aiheuttamien uusien fissioiden määrä on pienempi kuin yksi, reaktorin ketjureaktio pysähtyy. Toisaalta, jos fissioita aiheutuu useampi kuin yksi, ketjureaktion teho kasvaa. (Eurasto et al., 2004)



Kuva 2. Fissio (WNA, 2021 mukaillen)

Reaktorissa kiertävä primääripiirin vesi toimii reaktorin moderaattorina ja jäähdytteenä. Sen tehtävänä on jäähdyttää reaktorin sydäntä ja sitoa itseensä fissiossa vapautuvaa lämpöenergiaa. Lisäksi se hidastaa ydinreaktiossa syntyviä neutroneita. Kun reaktiossa vapautuvat neutronit törmäävät moderaattorin vetyatomin ytimeen, ne hidastuvat termiselle alueelle ja niiden liiketila muuttuu. Tämä mahdollistaa uudet fissiot termisellä alueella. (Eurasto et al., 2004)

Ydinreaktorissa fission kanssa taistelevia reaktioita ovat kappaukset. Kaappausreaktiossa ydin ottaa haltuunsa neutronin. Samalla sen massaluku kasvaa ja siitä muodostuu raskaampi isotooppi. Reaktorissa tapahtuvat kaappaukset mahdollistavat sen tehonsäädön. Ne sekä hillitsevät ketjureaktiota että kuluttavat ja synnyttävät uutta polttoainetta. (Eurasto et al., 2004)

Kaappausreaktioissa menetetään vapaa neutroni. Mikäli reaktiossa menetetään fiissili halkeamiskelpoinen ydin, puhutaan loiskaappauksesta. Kaappauksessa voi muodostua myös uutta polttoainetta konversioprosessin avulla. Konversiossa ydin kaappaa neutronin ja halkeaa. Kaappausta, jonka avulla syntyy uusi fissiili ydin, sanotaan fertiilikaappaukseksi. Esimerkiksi ^{239}Pu-isotooppia syntyy konversioprosessin avulla kun ^{238}U kaappaa neutronin. Plutonium tuottaa uraanin tavoin hajotessaan energiaa ja jopa kolmasosan reaktorin lämpötehosta. (WNA, 2023)

2.2 Reaktorin kriittisyys ja kasvutekijä

Laitoksen ylösajossa reaktorissa käynnistyy fissioreaktioita. Reaktorin teho kuvaa siellä tapahtuvien fissioiden määrää aikayksikössä. Vakaalla teholla toimiessaan reaktorin ketjureaktio pysyy tasaisesti yllä. Tällöin reaktorin sanotaan olevan kriittinen. Reaktorin kriittisyys on ehtona reaktorin käynnistymiselle ja ketjureaktion ylläpysymiselle. Kriittisyyttä kuvaava kasvutekijä k on neutronien syntymisnopeuden ja häviämisnopeuden suhde. Kasvutekijän laskennassa tarkastellaan reaktoria, jossa ei tapahdu neutronien ulosvuotoa ja joka on äärettömän suuri. (Marttila et al., 1971) Äärettömän reaktorin kasvutekijä voidaan laskea neljän tekijän kaavalla

$$k_\infty = \frac{\text{neutronien syntymisnopeus}}{\text{neutronien absorbtionopeus}} \tag{1}$$

$$k_\infty = \frac{fp\varepsilon\eta n}{n} = \varepsilon p f \eta \tag{2}$$

jossa n on neutronien määrä, f on terminen käyttösuhde, p on neutronikaappauksen välttämisen todennäköisyys resonanssialueella, ε on nopean fission tekijä ja η on neutronien tuottotekijä. (Andrews & Jelley, 2013)

Ydinreaktiossa syntyvä nopea neutroni voi aiheuttaa fission ennen hidastumistaan. Tällöin fissio tapahtuu nopealla energia-alueella ^{238}U-isotoopin avulla. Reaktion seurauksena syntyy lisää nopeita fissioneutroneita. Syntyneet neutronit kasvattavat nopeiden neutronien lukumäärää reaktorissa. Ilmiötä kuvataan nopean fission tekijällä ε. (Marttila et al., 1971)

Termisessä reaktorissa neutroneita voidaan menettää, kun ne hidastetaan termiselle energia-alueelle. Hidastuessaan neutronin on vältettävä kaappausreaktio resonanssialueella. Resonanssien välttämisen todennäköisyys p riippuu moderaattorin ominaisuuksista. (Andrews & Jelley, 2013)

Osa reaktorin neutroneista menetetään, kun ne absorboituvat rakenteisiin ja moderaattoriin. Terminen käyttösuhde f kuvaa polttoaineeseen absorboituvien neutronien suhdetta kaikkiin termisiin neutroneihin. (Andrews & Jelley, 2013)

Neutronien tuottotekijä η kuvaa fissiossa syntyvien nopeiden neutronien lukumäärän suhdetta polttoaineeseen absorboituviin termisiin neutroneihin. (Andrews & Jelley, 2013).

Todenmukaisessa äärellisessä reaktorissa osa neutroneista pääsee vuotamaan ulos. (Marttila et al., 1971) Tämä voidaan huomioida reaktorin vuotamattomuustekijöillä. Näin saadaan reaktorin efektiivinen kasvutekijä k_{eff} yhtälöllä

$$k_{\mathrm{eff}} = fp\varepsilon\eta P_{\mathrm{n}} P_{\mathrm{t}} \tag{3}$$

jossa P_n on nopeiden neutronien vuodonvälttämistodennäköisyys ja P_{t} termisten neutronien vuodonvälttämistodennäköisyys. (Jevremovic, 2009)

Kriittisen reaktorin kasvutekijä k_{eff} on yksi. Tällöin reaktorin ketjureaktio pysyy yllä sekä neutronien lukumäärä ja fissionopeus pysyvät vakiona. Reaktorin ollessa alikriittinen efektiivinen kasvutekijä on pienempi kuin yksi. Tällöin reaktorin ketjureaktio hiipuu. Ylikriittisen reaktorin neutronien lukumäärä ja reaktionopeus kasvavat. (Marttila et al., 1971)

2.3 Reaktiivisuus

Reaktorin tehoa voidaan säätää kasvutekijän k_{eff} arvoa muuttamalla. Ylösajossa kasvutekijää kasvatetaan siten, että alikriittisestä reaktorista saadaan kriittinen. Kasvutekijän pienentäminen johtaa tehon alenemiseen. Kasvutekijää voidaan pienentää esimerkiksi lisäämällä absorboivan aineen määrää reaktorissa. Absorbaattorina voidaan käyttää reaktorin säätösauvoja tai boorihappoliuosta. Neutronit absorboituvat polttoaineen sijasta booriin, jolloin reaktorista tulee alikriittinen. (Eurasto et al., 2004) Reaktorin kriittisyyden muutosta kuvaa reaktiivisuus. Ylikriittisen reaktorin reaktiivisuus on positiivista ja sen teho kasvaa. Vastaavasti alikriittisen reaktorin reaktiivisuus on negatiivista. Kriittisen reaktorin reaktiivisuus on nolla, sillä se ei muutu. (Marttila et al., 1971) Reaktiivisuus lasketaan efektiivisen kasvutekijän avulla. (Jevremovic 2019)

$$\rho = \frac{k_{\mathrm{eff}} - 1}{k_{\mathrm{eff}}} \tag{4}$$

Reaktiivisuuteen vaikuttavat fissiossa syntyvät reaktorimyrkyt. Ne ovat reaktiotuotteita, jotka absorboivat neutroneja boorin tavoin voimakkaasti itseensä. Reaktorimyrkkyjä ovat esimerkiksi jodin hajotessa syntyvä radioaktiivinen ^{135}Xe ja stabiili ^{149}Sm. Ne absorboivat

neutroneja tehokkaasti, mikä pienentää reaktorin kasvutekijää. (Jevremovic 2019). Tämä johtaa tehon laskuun ja ketjureaktion sammumiseen. (Eurasto et al., 2004)

Reaktorimyrkkyjen muodostuminen riippuu sen tehotasosta. Esimerkiksi ksenonia kertyy enemmän, jos reaktoria ajetaan pienellä teholla. Reaktorin myrkkyjen pitoisuudet vaikuttavat siihen, kuinka se reagoi tehotason muutoksiin. (Jevremovic, 2019) Ksenonia syntyy ydinreaktiossa jodin hajoamisen seurauksena. Se on jodin reaktiotuote, joten sen pitoisuus muuttuu suhteessa jodin pitoisuuteen. Kun reaktorin tehotasoa kasvatetaan, jodin pitoisuus kasvaa. Ksenonpitoisuus pienenee hetkellisesti ja nousee vasta viiveellä, kun syntynyt jodi puoliintuu. Ksenonpitoisuus nousee myös hetkellisesti jodin tuoton vähentyessä, kun reaktorin tehotasoa lasketaan. (Eurasto et al., 2004) Tilannetta, jossa reaktorin teho laskee ksenoniin kohdistuvien absorptioiden seurauksena, kutsutaan ksenonmyrkytykseksi. Reaktorin alasajon jälkeen on odotettava, että ksenonpitoisuus palaa takaisin lähtöarvoonsa jodin puoliintumisen jälkeen. Reaktori voidaan ajaa ylös uudelleen vasta pitoisuuksien tasaannuttua, jotta ksenonmyrkytykseltä vältytään. (Jevremovic, 2019)

2.4 Neutronitasapaino ja reaktorin tehon säätö

Reaktoria voidaan hallita ja sen reaktiivisuuden muutoksiin voidaan vaikuttaa tehonsäädöllä. Reaktiivisuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat polttoaineen kuluminen, muodostuvat fissiotuotteet sekä moderaattorin lämpötila. Reaktorin vakaa toiminta edellyttää tasapainoa neutroneita tuottavien fissioreaktioiden ja niitä kuluttavien absorptioreaktioiden välillä. Kun reaktori toimii tasaisella teholla, fissiossa syntyvistä neutroneista yksi johtaa uuteen fissioon. Loput neutroneista jäävät ylimääräisiksi ja kasvattavat reaktorin kasvutekijää. Tätä kasvutekijän ylijäämää kuvaa ylijäämäreaktiivisuus. Se on suurimmillaan käyttöjakson alussa ja se mahdollistaa ketjureaktion käynnistymisen. Sen vaikutusta kompensoidaan absorbaattoriliuoksella eli boorihapolla (Eurasto et al., 2004)

Polttoaineen kulumista ajan suhteen kuvaa palama. (Eurasto et al., 2004) Reaktorin kriittisyyden raja-arvo ilmaistaan palaman suhteena. Polttoaineen kuluessa fissiokelpoisten ydinten määrä vähenee reaktorissa. Tästä syystä alikriittisyyden varmentamiseksi riittää pienempi boorihappopitoisuus käyttöjakson loppupuolella. (Fortum, 2024a)

Polttoainepelletteihin voidaan sisällyttää palavaa myrkkyä reaktiivisuuden rajoittamiseksi. Esimerkiksi VVER-440 reaktorissa gadoliniumia voidaan käyttää polttoaineen käyttöiän pidentämisessä. Gadolinium absorboi itseensä neutroneja ja rajoittaa reaktiivisuuden kasvua käyntijakson alussa. Gadoliniumin lisääminen polttoaineeseen alentaa sen reaktiivisuuden kasvua käyntijakson alussa ja mahdollistaa sille korkeamman väkevöintiasteen. Käyntijakson edetessä gadolinium palaa asteittain ja hajoaa nuklideiksi, joilla on alhaisempi neutroniabsorptio. (WNA, 2021)

Halkeamisessa suoraan syntyviä neutroneita kutsutaan kerkeiksi neutroneiksi. Osa neutroneista syntyy kuitenkin vasta viiveellä fissiotuotteiden hajotessa. Viivästyneet neutronit mahdollistavat reaktorin tehon hallinnan ja pitävät sen kriittisenä. (WNA, 2024) Reaktiivisuuden kasvaessa viivästyneet neutronit hidastavat reaktorin tehonnousua. Tehonnousu kiihtyy viiveellä vasta silloin, kun viivästyneet neutronit palautuvat neutronikiertoon. Kun reaktorin tehoa lasketaan, viivästyneet neutronit vaimentavat tehon muutosnopeutta ja hillitsevät nopeaa reaktiivisuusmuutosta. Mikäli viivästyneet neutronit eivät ehdi hillitsemään tehon nousua, puhutaan kerkeästi kriittisestä tai kerkeästi ylikriittisestä reaktorista. (Eurasto et al., 2004)

Turvallisuuden varmistamiseksi reaktori säädetään siten, että siitä saadaan alimoderoitu. Alimoderoidussa reaktorissa tehoa kasvattavan tekijän lisääntyminen johtaa tehon alenemiseen. Tehon säädössä voidaan käyttää reaktorin luontaisia negatiivisia takaisinkytkentöjä tai absorboivan aineen pitoisuuksia voidaan muuttaa reaktorissa. Esimerkkinä alimoderoidun reaktorin negatiivisesta takaisinkytkennästä toimii moderaattorin lämpötila. Lämpötilannousun seurauksena moderaattorin tiheys pienenee, mikä heikentää sen hidastusvaikutusta termiselle alueelle. Tämä lisää nopeiden neutronien absorptiota fertiileihin isotooppeihin ja kasvattaa neutronivuota ulos reaktorista. Reaktiivisuus pienenee, kun termisellä alueella on käytettävissä vähemmän hidastettuja neutroneita. Muutos toimii myös toiseen suuntaan. Mikäli jäähdytteen virtausnopeutta lisätään, reaktorin lämpötila kääntyy laskuun. Tällöin moderaattorin tiheys kasvaa lisäten reaktiivisuutta. (Eurasto et al., 2004)

Absorboivan aineen määrän muutoksen huomattiin vaikuttavan reaktorin tehoon. Säätöabsorbaattorilla voidaan laskea tai nostaa reaktorin tehotasoa tarkoituksen mukaisesti. Säätöön tarvittavan absorbaattorin määrä riippuu reaktorin tehotasosta ja käyttöjakson pituudesta. Esimerkiksi tehonnoston jälkeen absorbaattoria on vähennettävä, kunnes reaktorimyrkkyjen pitoisuudet palautuvat tasapainoarvoonsa. Palamajakson edetessä reaktorin

ylijäämäreaktiivisuus pienenee polttoaineen kuluessa. Tämän seurauksena pienempi negatiivinen reaktiivisuus muutos riittää saattamaan reaktorin alikriittiseksi.

2.5 Jälkilämpö

Alasajossa painevesireaktorin ketjureaktio pysäytetään säätösauvojen avulla. Lisäksi primääripiirin boorihappopitoisuutta lisätään. Neutronien absorptio polttoaineeseen loppuu eikä uusia fissioita enää tapahdu. (Fortum, 2024a) Alikriittisen reaktorin radioaktiivisten fissiotuotteiden hajoaminen kuitenkin jatkuu ja samalla syntyy lämpöenergiaa. Hajoamisessa syntyvää energiaa sanotaan jälkilämmöksi. Ydinreaktoria on jäähdytettävä, jotta polttoaineen jälkilämpöteho pienenee eikä reaktorin sydän kuumene. (STUK, n.d.a)

Jälkilämmön poisto tapahtuu Loviisan reaktoreissa jälkilämmönpoistojärjestelmän avulla. Primääripiirin pumppujen sammutuksen jälkeen jälkilämpö siirtyy luonnonkierrolla. Jäähdytteeseen muodostuu reaktorissa syntyvän lämmön ansiosta tiheysero, joka saa sen kiertämään höyrystimen ja reaktorin välillä. Höyrystimessä lämpö siirtyy sekundääripuolelle, jossa jälkilämmönpoistojärjestelmä ohjaa lämpöä jälkilämmönvaihtimeen ja edelleen meriveteen. (Fortum, 2021)

Jälkilämmön poistoon osallistuvien järjestelmien tulee olla kunnossa, kun reaktori ajetaan alas. Kunnossaolovaatimuksia kohdistuu myös lämmönpoistoa varmentaviin järjestelmiin, kuten sähkönsyöttöön ja hätälämmönsiirtoketjuun, joiden tarkoituksena on huolehtia jälkilämmönpoistosta onnettomuustilanteessa. (Fortum, 2024a) Jälkilämmön poisto ja alikriittisyyden varmistaminen ovat keskeisiä turvallisuuteen vaikuttavia asioita, kun reaktoria ajetaan alas seisokkia varten. Seisokin aikaiset kunnossaolovaatimukset liittyvät pääasiassa näiden toimintojen turvaamiseen.

3 Käyttötilojen vaatimuspohja

Ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta vastaa luvanhaltija. Laitoksen toimintaa ohjaavat johdannossa esitellyt viranomaisten laatimat lait, ohjeet ja säädökset. Viranomaisvaatimuksilla pyritään varmistamaan laitoksen turvallinen ja suunnitteluperusteiden mukainen käyttö. (Y/1/2018)

3.1 Turvallisuusperiaatteet

Ydinvoimalaitoksen suunnittelu, rakentaminen ja käyttö perustuvat syvyyssuuntaiseen turvallisuusperiaatteeseen. Turvallisuusjärjestelmät suunnitellaan ja rakennetaan siten, että ne varmentavat toisiaan. Syvyyssuuntaisella turvallisuusajattelulla pyritään estämään ja ennaltaehkäisemään poikkeamien syntymistä, suojaamaan laitosta sekä sisäisiltä että ulkoisilta poikkeamilta ja lieventämään niiden mahdollisesti aiheuttamia seurauksia. (Y/1/2018) Ennalta ehkäisevällä tasolla poikkeaman syntyminen koetetaan estää noudattamalla tarkkaan laadittuja ohjeistuksia. Suojaavalla tasolla yritetään havaita mahdolliset poikkeamat normaalikäytöstä ja estämään niiden syntyminen tai paheneminen. Mikäli poikkeaman syntymistä ei voida estää, sen aiheuttamia seurauksia lievennetään. (STUK, n.d.b)

Ydinenergialaissa vaaditaan, että ydinvoimalaitoksen turvallisuus on varmistettava peräkkäisillä ja toisistaan riippumattomilla suojauksilla (Ydinenergialaki (990/1987) 7 b). Rakenteellisella syvyyssuuntaisella puolustuksella tarkoitetaan peräkkäisiä, sisäkkäin rakennettuja turvallisuustoimintoja. Esimerkiksi radioaktiivisten aineiden leviämistä estetään moninkertaisilla sisäkkäin rakennetuilla leviämisesteillä. (STUK, n.d.b) Syvyyssuuntaista puolustusta varmennetaan moninkertaisuus-, erottelu ja erilaisuusperiaatteiden avulla (Y/1/2018 11 §:n 3). Erilaisuusperiaatetta käytetään varaamalla tärkeän toiminnon suorittamiseen erilaisilla toimintaperiaatteilla toimivia järjestelmiä. Tällöin yhden toimintaperiaatteen vikaantuminen ei estä toiminnon suorittamista. Esimerkiksi reaktorin ketjureaktio voidaan pysäyttää joko reaktorin säätösauvojen tai absorbaattoriliuoksen avulla. Toiminnot varmentavat toisiaan, sillä reaktorista saadaan alikriittinen kummankin järjestelmän avulla. Mikäli toisen järjestelmän toimintatapaan kohdistuu vika, haluttu toiminto saadaan suoritettua toisella tavalla. (STUK, n.d.b)

Erilaisuusperiaatteen lisäksi tärkeitä turvallisuustoimintoja varmennetaan tekemällä turvallisuusjärjestelmistä moninkertaiset eli redundanttiset rinnakkaisperiaatteen mukaisesti. Ydinvoimalaitoksella redundanttisia järjestelmiä käytetään varmentamaan toisiaan. Järjestelmät suunnitellaan siten, että eri redundanssit toimivat toisistaan riippumattomasti. Esimerkiksi Loviisassa turvallisuusjärjestelmät on rakennettu kahteen toisistaan riippumattomaan redundanssiin. Osa redundanssien toiminnallisista laitteista on kahdennettu siten, että yksikin riittää suorittamaan halutun toiminnon. Varmennuksen ansiosta toisen laitteen tai toisen redundanssin vikaantuminen ei vaaranna toiminnon suorittamista. Poikkeamien kohdistumista järjestelmän useampaan redundanssiin voidaan estää erotteluperiaatteen avulla. Järjestelmien redundanssit voidaan sijoittaa erillisiin tiloihin laitoksella. Tällä pienennetään todennäköisyyttä sille, että alueellinen poikkeama kuten tulva kohdistuisi useampaan redundanssiin samanaikaisesti. (STUK, n.d.b)

3.2 Turvallisuustekniset käyttöehdot

Turvallisuustekniset käyttöehdot on laitoksen turvallisen toiminnan rajat määrittävä asiakirja. Se on laitosyksikkökohtainen ja kattaa kyseisen laitosyksikön toiminta-arvot, toimintatilat, käyttörajoitukset, tarkkailuvaatimukset sekä käyttöhenkilökuntaa koskevat hallinnolliset vaatimukset. (Fortum, 2024a) TTKE:lle asetetut määräykset vaikuttavat sen sisältöön ja rakenteeseen.

IAEA:n turvallisuusstandardeissa määritetään, että TTKE:ssa tulee olla rajat ja ehdot normaalille toiminnalle. Normaalilla toiminnalla tarkoitetaan, että laitos toimii suunnitelluissa ja vahvistetuissa turvallisuusrajoissa. TTKE:n turvallisuusrajat tulee asettaa konservatiivisiksi, jotta kaikki turvallisuusjärjestelmien epävarmuustekijät pystytään huomioimaan. Epävarmuustekijät määritellään laitoksen turvallisuusanalyyseissä. Lisäksi TTKE:ssa asetetaan vaatimukset valvonnalle, jotta turvallisuusrajoissa pysyminen voidaan varmistaa. (IAEA, 2000)

Turvallisuusjärjestelmien hyväksyttävä tila sekä niiden käynnistymisen raja-arvot määritellään TTKE:ssa. (IAEA, 2000) TTKE:n rajojen tulee kattaa sellaisten prosessisuureiden rajat, jotka vaikuttavat leviämisesteiden eheyteen. Asiakirjassa tulee määritellä suojaus- ja rajoitusjärjestelmien käynnistymisen raja-arvot. (YVL A.6)

Turvallisuusrajojen lisäksi TTKE:ssa vaaditaan tiettyjen laitteiden, rakenteiden ja järjestelmien käyttökuntoisuutta. Tällä tarkoitetaan sitä, että järjestelmä apujärjestelmineen toimii ja on valmis käyttöönottoon. Lisäksi järjestelmän tarvitsema automaatio tulee olla kunnossa. Kunnossa olevan järjestelmän tulee toimia vaaditulla toiminta-alueella ja sen käytön aikaisissaolosuhteissa tavalla, johon se on suunniteltu. Vaatimukset riippuvat järjestelmän käyttötarkoituksesta ja laitoksen käyttötilasta. Epäkunnossa oleva laite, järjestelmä tai komponentti on sellainen, joka ei ole toimintakunnossa kaikilta osiltaan. (Fortum, 2024a)

TTKE:n tulee sisältää laitoksen käyttötilat ja niiden raja-arvot. Käyttötilat määritellään mitattavista parametreista tai suoraan tunnistettavasta arvosta. Käyttötilan raja-arvo voidaan ilmaista myös suhteena reaktorin tehoon. (IAEA, 2000) Esimerkiksi Loviisan laitoksen käyttötilojen määritelmissä neutronitehon rajoitus ilmaistaan suhteena nimellistehoon. (Fortum, 2024a) Käyttötilojen tulee käsittää kaikki laitoksen normaalin toiminnan tilanteet käynnistämisestä tehoajoon sekä sammuttamiseen. Käyttötilojen tulee myös kattaa reaktorin polttoaineen vaihto sekä laitoksen huolto ja sen järjestelmien testaus. (IAEA, 2000)

Sallitussa käyttötilassa TTKE:n vaatimukset täytetään ilman poikkeuksia. Mikäli vaatimuksista poiketaan, voidaan vika korjata järjestelmän, laitteen tai rakenteen TTKE:ssa määritetyn sallitun poikkeuksen puitteissa. Jos vikaa ei saada korjattua, laitos on ajettava sellaiseen käyttötilaan, jossa järjestelmän perustilavaatimukset täyttyvät. Mikäli esiintyvä vika on sellainen, jonka takia järjestelmä ei täytä minkään käyttötilan vaatimuksia, laitos on ajettava tai jätettävä käyttötilaan, joka on vikojen suhteen turvallisin. (Fortum, 2024a)

Turvallisen käytön varmistamiseksi TTKE rakennetaan siten, että sen teksti on ymmärrettävää ja selkeää. Asiakirjan täytyy muodostaa looginen kokonaisuus jonka osat liittyvät toisiinsa. (IAEA, 2000) Molempien Loviisan voimalaitosyksiköiden TTKE:t rakentuvat samalla tavalla, mutta asiakirjoissa on kuitenkin eroavaisuuksia, sillä laitosyksiköt eivät ole täysin samanlaisia. (Fortum, 2024b)
Laitosten rakenteellisten erojen lisäksi järjestelmien nimissä ja tunnuksissa on eroavaisuuksia, mikä näkyy laitosyksiköiden TTKE:n vaatimusten välisinä eroina. TTKE:ssa on myös eroavaisuuksia sellaisten järjestelmien osalta, jotka löytyvät vain toiselta laitokselta. Näiden järjestelmien vaatimukset esitetään vain kyseisen laitoksen TTKE:ssa. Esimerkiksi käytetyn polttoaineen varaston vaatimukset löytyvät vain toiselta laitosyksiköltä. (Fortum, 2024b)

Laitosyksiköiden välisiä eroja ei kuitenkaan käsitellä tässä työssä tarkemmin, sillä vuosihuollot pyritään toteuttamaan vuorotellen. Tästä syystä myös vuosihuoltoseisokin jälkeiset ylösajotarkastukset kohdistuvat yhteen laitokseen kerrallaan. Poikkeuksena ylösajotarkastuksessa ovat sellaiset järjestelmät, jotka ovat yhteisiä molemmille laitoksille. Koska laitosyksiköiden vuosihuollot pyritään toteuttamaan eri aikaan, toinen laitosyksiköistä on tällöin tehokäytöllä. Yhteisten järjestelmien vaatimukset määräytyvät tällöin tiukemman eli pääsääntöisesti käyvän laitoksen perusteella. (Fortum, 2024a)

3.3 Turvallisuusteknisten käyttöehtojen sisältö

Turvallisuusteknisissä käyttöehdoissa asetetaan käyttökuntoisuusvaatimukset turvallisuuden kannalta tärkeille laitteille, järjestelmille ja rakenteille. Vaatimukset esitetään TTKE:n käyttörajoituksissa jokaiselle sen alaiselle järjestelmälle käyttötilakohtaisesti. Vaatimuksen tai sen sallitun poikkeuksen täyttyessä katsotaan, että järjestelmä toimii hyväksyttävässä tilassa. (Fortum, 2024a)

Käyttörajoitusten vaatimusten toteutumista seurataan määräaikaiskoestuksilla- ja tarkastuksilla. Säännöllisin väliajoin toistuvilla koestuksilla testataan järjestelmän toimintakuntoisuutta ja -aluetta. Lisäksi laitoksella tehdään ennakkohuoltoja TTKE:n alaisille järjestelmille. Ennakkohuollot ovat niille eriteltyjä toimenpiteitä, joilla huolletaan sekä tarkastetaan sen kuntoa. (Fortum, 2024a)

3.3.1 Käyttörajoitukset

Käyttörajoitusten tarkoituksena on ilmaista turvallisuusjärjestelmien hyväksyttävä tila. (Fortum, 2024a) Käyttörajoituksia sovelletaan vain laitoksen toimiessa normaalisti. Häiriö-, hätä- ja onnettomuustilanteissa toimitaan erikseen niitä varten määriteltyjen ohjeiden mukaan. (YVL A.6) Loviisan TTKE:n käyttörajoitukset rakentuvat kolmesta osasta. Rajoituksissa esitetään järjestelmien perustilavaatimukset (A), sallitut poikkeukset perustilavaatimuksista ja toimenpiteet (B) sekä perusteet (C). Käyttörajoitukset määrittelevät vähimmäisehdot turvalliselle toiminnalle eri käyttötiloissa. Käyttörajoituksen perusteena ovat järjestelmän toiminnalliset minimivaatimukset sekä käyttörajoituksen kriteerit. (Fortum, 2024a)

Mikäli perustilavaatimuksia ei täytetä, laitoksen toimintaa voidaan jatkaa sallittujen poikkeuksien edellytysten rajoissa. Ne määrittelevät toimenpiteet tilanteisiin, jossa perustilavaatimusten kriteerejä ei täytetä. Vaadittavia toimenpiteitä voivat olla esimerkiksi vian tai poikkeaman korjaaminen annetussa määräajassa. Vaihtoehtoisesti järjestelmän, rakenteen tai laitteen tilaa voidaan muuttaa siten, että käyttörajoituksissa määritellyt vaatimukset täyttyvät. Perustilavaatimusten sallituissa poikkeuksissa voidaan esittää myös korvaavia toimenpiteitä, joiden avulla vaadittava turvallisuustaso saadaan ylläpidettyä. Mikäli käyttörajoituksen perustilavaatimuksia ei täytetä tai vaadittavan turvallisuustason ylläpitäminen ei ole korvaavin tai vaihtoehtoisin toimenpitein mahdollista, laitos ajetaan turvallisimmaksi arvioituun käyttötilaan. (Fortum, 2024a) TTKE:ssa sallittujen toimenpiteiden avulla laitoksen turvallisuustasoa ylläpidetään poikkeamasta huolimatta. Toimenpiteet ovat etukäteen määriteltyjä toimintatapoja, jotka on arvioitu, analysoitu ja hyväksytty. Määrittelyllä halutaan ennakoida ja luoda toimintatavat poikkeamien aiheuttamiin tilanteisiin.

Järjestelmä on hyväksyttävässä kunnossa, kun se täyttää perustilavaatimukset tai toimii sallittujen poikkeuksien puitteissa. Poikkeuksesta astuu voimaan käyttörajoitus, joka määrittelee järjestelmään kohdistuvat toimenpiteet. (Fortum, 2024a)

3.3.2 Määräaikaiskoestukset

Määräaikaiskoestuksilla ja -tarkastuksilla seurataan järjestelmien toimintakuntoa ja todennetaan TTKE:n perustilavaatimusten täyttyminen. TTKE:ssa määritellään eri käyttötiloissa suoritettavat määräaikaiskoestukset ja -tarkastukset sekä niiden aikataulu. Niiden kattavuus ja laajuus riippuu järjestelmän TTKE-vaatimuksista. Määräaikaiskoestuksia ja -tarkastuksia tehdään erityisesti sellaisille järjestelmille, jotka eivät ole aktiivisesti käytössä. Koestusten avulla seurataan erityisesti varalla olevien turvallisuusjärjestelmien käyttökuntoa. Koestuksia varten pyritään luomaan olosuhteet, jotka jäljentävät mahdollisimman todenmukaisia järjestelmän käyttöolosuhteita. (YVL A.6)

TTKE:ssa määritellään koestukset, joiden aikana järjestelmään on sallittua aiheuttaa epäkäytettävyyttä. (Fortum, 2024a) Koestusten aiheuttama TTKE:n alaisten laitteiden epäkäytettävyysaika on pidettävä mahdollisimman lyhyenä. (Inkinen, 2023) Mikäli järjestelmän koestuksessa nousee esiin vika, toimitaan käyttörajoituksissa määriteltyjen toimenpiteiden mukaisesti. (Fortum, 2024a)

3.3.3 Ennakkohuollot

Ennakkohuollot ovat ennalta määriteltyjä järjestelmien huoltotoimenpiteitä, joiden aikana niille on sallittua aiheuttaa epäkäytettävyyttä. TTKE:ssa kerrotaan kaikki sen alaiset laitteet, joille saa aiheuttaa käyttökunnottomuutta käyntitiloissa huoltotöiden takia. Tällä halutaan varmistaa, että järjestelmä on käyttökunnossa ja taata sen käytettävyys pitkällä aikavälillä. Huollon aiheuttama epäkäytettävyysaika on kuitenkin pidettävä mahdollisimman lyhyenä. (Fortum, 2024a)

Ennakkohuollot suoritetaan käyttörajoitusten sallittujen poikkeuksien puitteissa. Huoltotyöt kohdistetaan yhteen redundanssiin kerrallaan siten, että TTKE:n vaatimus rinnakkaisten käytettävissä olevien laitteiden määrästä täyttyy. Ennakkohuoltotyölle voidaan määrittää esimerkiksi aikarajoitus tai muu sen suorittamista rajoittava ehto. Kaikkia huoltotöitä ei pystytä tekemään laitoksen tehokäytön aikana. Esimerkiksi primääripiirin kohdistuvat työt vaativat laitoksen alasajoa. Tällaiset työt voidaan ajoittaa laitoksen vuosihuoltoon. Seisokkiin voidaan ajoittaa myös sellaisia töitä, jotka voitaisiin hoitaa tehokäytön aikana, mikäli näin saadaan minimoitua järjestelmään kohdistuva epäkäytettävyysaika. (Fortum, 2024a)

3.4 Turvallisuuden todentaminen

TTKE:ssa esitettyjen teknisten ja hallinnollisten vaatimusten avulla varmistetaan laitoksen suunnitteluperusteiden ja turvallisuusanalyysien lähtökohtien mukainen käyttö. (Y/1/2018) Ydinvoimalaitoksen turvallista toimintaa todennetaan ja seurataan jatkuvasti turvallisuusanalyysien avulla. Analyysimenetelminä käytetään PRA:ta (Probablistic Risk Assesment) eli todennäköisyyspohjaista riskiarviointia sekä deterministisiä analyysejä. (YVL A.6)

PRA:n avulla arvioidaan laitoksen turvallisuusteknisten käyttöehtojen kattavuutta ja kehitetään sen turvallisuutta. Analyysimenetelmällä pystytään analysoimaan vaadittujen määräaikaiskoestuksien ja -tarkastusten sekä ennakkohuoltojen kattavuutta. Analyysin avulla voidaan arvioida uusien esiin nousevien riskitekijöiden turvallisuusmerkitystä sekä asettaa laitoksen muutostarpeita tärkeysjärjestykseen. Lisäksi sen avulla verrataan muutostarpeita ja vaihtoehtoisia turvallisuusratkaisuja. (YVL A.7)

Deterministisiä turvallisuusanalyysejä käytetään laitoksen turvallisuusratkaisujen perusteena. Deterministisessä analyysissä tutkitaan häiriö- ja onnettomuustilanteita sekä laitoksen kykyä suoriutua niissä. Analyysien perusteena käytetään STUK:n YVL B.3 –ohjeen oletuksia. (YVL B.3) Mikäli laitoksen järjestelmiin tehdään muutoksia, analyysit tehdään uudestaan ajantasaisten tietojen mukaan. (YVL A.6)

Analyysien avulla laitoksen turvallisuustasoa ylläpidetään ja parannetaan uusimman tietämyksen pohjalta. Analyysien tulokset raportoidaan ja raportointimenetelmiä kehitetään jatkuvasti. Analyysit ovat perusteena TTKE:n muutoksille ja sen vaatimusten päivittämiselle. TTKE:ta tulee pitää ajantasaisena ja päivittää uusien laitos- ja ohjemuutosten mukaiseksi. (YVL A.7) Näin täytetään YVL A.6 -vaatimus TTKE:n päivittämisestä ja ylläpidosta sekä vältetään turvallisuustason heikkeneminen. TTKE:n päivittäminen ja ylläpito on tarpeen, sillä tavoiteltava turvallisuustaso muuttuu analyysien ja käyttökokemuksen myötä. TTKE:n muutokset hyväksytetään STUK:ssa ennen käyttöönottoa. (YVL A.6)

4 Käyttötilat Loviisan voimalaitoksella

Ydinvoimalaitoksella käyttötiloja vaihdetaan laitoksen tuotannon ylös- ja alasajossa. Vuosihuollossa laitos ajetaan alas, jotta reaktorin polttoainetta voidaan vaihtaa ja järjestää reaktoriin uudelleen. (Fortum, 2023a) Samalla tehdään myös sellaisia huolto- ja kunnostustöitä, joita ei tehokäytön aikana voida tehdä. Loviisan voimalaitoksella käyttötilat jaotellaan käynti- ja seisokkitiloihin. (Fortum, 2024a)

Käyttötiloja on kuusi. Niiden vaatimukset riippuvat reaktorin ja primääripiirin tilasta. Kun laitos ajetaan alas ja reaktorin ketjureaktio pysäytetään, jälkilämmönpoistosta on huolehdittava turvallisuuden varmentamiseksi. Tämän takia lämmönpoistoon osallistuville ja sitä varmentaville järjestelmille esitetään TTKE:ssa turvallisuusvaatimuksia myös laitoksen seisokkiin. (Fortum, 2024a)

Laitokselle on määritelty käyttötilojen lisäksi erityisvaiheita, joihin siirrytään tietyssä käyttötilassa. Erityisvaiheessa suoritetaan siihen liittyvät työtehtävät TTKE:ssa määritellyin vaihein. Työvaiheiden toteutumista seurataan tarkastus-, seuranta ja kuittausmenettelyiden avulla. Yksi erityisvaiheista on latausseisokin tilanne, jolloin reaktorissa ei ole polttoainetta (POP). Tällöin itse reaktorin jälkilämmönpoistoa koskevat vaatimukset eivät ole voimassa. Polttoaine kuitenkin siirretään polttoainealtaaseen, jonka vaatimukset vuorostaan kiristyvät jälkilämmönpoiston osalta. (Fortum, 2024a)

Taulukko 1. Loviisan voimalaitoksen käyttötilojen määritelmät

Käyttötila	Käyttötilanehto	Primääripiirin paine	Primääripiirin lämpötila	Boorihappopitoisuus	Neutroniteho
		[bar]	[°C]	[g/kg H_2O]	[%]
Latausseisokki	LAT	ei paineistettu	alle 70	14 ± 1	0
Kylmäseisokki	KYL	alle 30	alle 95	14 ± 1	0
Kuumaseisokki	KUU	P_B –125	95–165	14 ± 1	0
Kuumavalmius	KUV	P_B –125	165–308	B_A –15	0
Käynnistystila	KÄT	121–125	250–308	alle B_A	alle 2
Tehokäyttö	KÄY	121–125	alle 308	alle B_A	yli 2

4.1 Seisokkitilat

Vuosihuollon aikana Loviisan voimalaitos ajetaan polttoaineen vaihtoa ja uudelleen järjestelyä varten latausseisokkiin. Polttoaineen latauksessa siirretään käytettyä, aktiivisuutta sisältävää polttoainetta. Käytetyn polttoaineen säteilyä vaimennetaan pitämällä reaktori- ja polttoainealtaan pinta tarpeeksi korkealla. Altaan riittävällä vesimäärällä taataan polttoaineen jäähdytys. Polttoainealtaan veden lämpötilan yläraja 70°C perustuu sen tiiveyden varmistamiseen. Polttoaineen latauksen yhteydessä reaktorin primääripiiri on avoin, sillä paineastian kansi on poistettu. Tämän johdosta primääripiirin paineelle ei ole asetettu raja-arvoa latausseisokissa. Polttoaineen latauksen ja muiden primääripiiriin kohdistuvien töiden aikana reaktorin on pysyttävä alikriittisenä. Kasvutekijän nousu estetään ja alikriittisyys varmistetaan primääripiirin korkealla boorihappopitoisuudella. Lisäksi alikriittisyys varmistetaan säätösauvojen avulla. (Fortum, 2024a)

Latausseisokin jälkeen laitoksen ylösajoa jatketaan käyttötilan vaihdolla kylmäseisokkiin. Tässä käyttötilassa primääripiiri on tiivis ja sitä aletaan paineistamaan. Piirin paine pidetään alle 30 baarin, jotta reaktorin kylmä paineastia säilyy ehjänä. Toiminnassa olevien kiertopiirien lämpötilan tulee olla alle 95 °C. Tällä varmistetaan, että primääripiirin vesi ei pääse kiehumaan. Kylmäseisokissa reaktorin alikriittisyys varmistetaan pitämällä boorihappopitoisuus käyttötilan raja-arvojen sisällä. (Fortum, 2024a)

Kuumaseisokkiin siirryttäessä reaktorin lämpötilaa nostetaan. Käyttötila toimii siirtymävaiheena kohti käyntitiloja. Reaktori on edelleen seisokkitilassa, joten alikriittisyys varmistetaan pitämällä boorihappopitoisuus korkeana. Toimivien kiertopiirien lämpötilan tulee olla 95 ja 165°C välillä. Paineen sallittu alue on raja-arvojen P_B ja 125 baarin välissä. Sallittu alue on primääripiirin kiehumakäyrän avulla määritelty turvallinen alue, jossa reaktori toimii sen suunnitteluperusteiden mukaisesti. P_B on primääripiirin paineen raja-arvo, joka määritetään jäähdytteen ulostulolämpötilan mukaan. Kuumaseisokin sisällä siirrytään erityisvaiheeseen, jossa suoritetaan primääripiirin tiiveyden varmistava tiiveyskoe. Kokeessa primääripiirin paine nostetaan yli 125 baariin. Erityisvaiheen aikana myös lämpötilalle asetettu raja-arvo on sallittua ylittää. (Fortum, 2024a)

4.2 Käyntitilat

Käyntitiloihin siirryttäessä turvallisuusvaatimukset kiristyvät. Lämmönsiirtoketjuun osallistuvien ja sen toimintaa varmistavien järjestelmien tulee olla toimintakunnossa primääripiirin lämpötilan noustessa. Kuumavalmiustilassa primääripiirin lämpötila pidetään 165 ja 308°C välissä määriteltyjen mittausten osalta. Paine on sallitulla alueella paineen P_B ja 125 baarin välissä. Lämpötilan ja paineen raja-arvot perustuvat primääripiirin kiehumakäyrään. Reaktori pidetään alikriittisenä kuumavalmiustilassa. Primääripiirin boorihappopitoisuuden B_I tulee olla suurempi kuin palaman suhteen määritellyn alarajan B_A-arvo. (Fortum, 2024a)

Käynnistystilassa lämpötilaa pidetään määriteltyjen mittausten osalta 250 ja 308°C välissä. (Fortum, 2024a) Tällöin reaktorin kuudes pääkiertopumppu voidaan käynnistää, sillä reaktorin yli oleva paine-ero laskee lämpötilan noustessa. Reaktorin sisäosat voisivat alkaa kellumaan, mikäli reaktoriin kasvaisi liian suuri paine-ero kuudennen pumpun käynnistämisen takia. (Honkala, 1985) Painetta nostetaan tehokäyttöä vastaaviin paineisiin 121 ja 125 baarin väliin. Kun primääripiirissä vallitsevat normaalit käyttöolosuhteet, aloitetaan reaktorin kriittisyysajo. Käynnistystilassa säätösauvat nostetaan reaktorista TTKE:n määrittämän alarajan yläpuolelle. Primääripiirin boorihappopitoisuutta laimennetaan palamatilan funktion arvoja pienemmäksi. Tämän seurauksena reaktori ei ole enää alikriittinen. Neutroniteho on käynnistystilassa korkeintaan 2 % nimellistehosta. Ennen tehonnostoa kaikki TTKE:n vaatimat tarkastukset tulee olla tehtynä ja turvallisuuteen vaikuttavien järjestelmien sekä mittausten tulee olla toimintakunnossa. (Fortum, 2024a)

Reaktori on tehokäytöllä, kun neutroniteho on yli 2 % nimellistehosta. Tehokäytössä määriteltyjen mittausten lämpötilan tulee olla alle 308°C. Paine pidetään tehokäytön painerajoissa, jotta estetään jäähdytteen kiehunta. Boorihappopitoisuus pidetään palamatilan funktion arvojen alapuolella reaktorin kriittisyyden säilyttämiseksi. Kriittisyyden boorihappopitoisuuden raja-arvo laskee käyttöjakson palaman edetessä. (Fortum, 2024a)

4.3 Käyttötilan vaihtaminen

TTKE:ssa määritellään tarkastus-, seuranta- ja kuittausmenettelyt jokaiselle käyttötilan vaihdolle. Menettelyt esitetään tarkastuslistoissa, jotka käydään läpi ja kuitataan vaatimusten

täyttyessä. Käyttötilasta voidaan siirtyä ainoastaan alas- tai ylösajojärjestyksessä seuraavaan käyttötilaan. (Fortum, 2024a)

Käyttötilaa vaihdettaessa on huomioitava uuden käyttötilan käyttörajoitusvaatimukset. Käyttötilanvaihto voidaan suorittaa mikäli perustilavaatimukset täyttyvät. Tilanteessa, jossa perustilavaatimukset eivät täyty, siirrytään TTKE:ssa sallittuihin poikkeuksiin. Tällöin selvitetään voidaanko toimintaa kyseisessä käyttötilassa jatkaa. Ylösajossa ei voida siirtyä seuraavaan käyttötilaan käyttörajoitusten poikkeuksissa määriteltyjen sallittujen toimenpiteiden puitteissa. Seuraavaa käyttötilaa ei voida vaihtaa eikä toimintaa kyseisessä käyttötilassa jatkaa, jos perustilavaatimuksen rikkovaa poikkeamaa ei saada korjattua sallituilla toimenpiteillä. Laitos on ajettava sellaiseen käyttötilaan, joka on vikojen suhteen turvallisin. (Fortum, 2024a)

Käyttötilan vaihdossa suoritettavat menettelyt riippuvat vaihdettavasta käyttötilasta. Siirtymän tarkastusmenettelyjen laajuus riippuu, siitä onko kyseessä ollut vuosihuolto- vai korjausseisokki. (Fortum, 2024a) Käyttötilan vaihtoon määritellyt ohjeistukset vaativat laitosorganisaation eri osa-alueiden arviota ja kirjallista lupaa käynnistämiselle huoltoseisokin jälkeen. Käynnistystilaan siirtyminen vuosihuollon jälkeen edellyttää STUK:in lupaa. (Fortum, 1994)

5 Käyttötilanehtojen määritteleminen

Laitoksen ylösajossa käyttötilanehto asetetaan järjestelmälle siihen käyttötilaan, jossa sen tulee olla toimintakunnossa. Käyttötilanehtoja määriteltäessä on oleellista tietää käyttöpaikan järjestelmän käyttötarkoitus ja sen toteuttaman toiminnon merkitys. Järjestelmän toiminnon turvallisuusmerkitys vaikuttaa sille asetettuihin vaatimuksiin. (Fortum, 2023b)

Yksittäisvika on yksittäinen poikkeama. Turvallisuustoimintoja suorittavat järjestelmät suunnitellaan siten, että ne täyttävät yksittäisvikakriteerin. Tällä tarkoitetaan sitä, että yksittäinen vika tai poikkeama ei estä järjestelmää suorittamasta haluttua turvallisuustoimintoa. Yksittäisvikakriteerin (N+1) täyttävä järjestelmä pystyy suorittamaan turvallisuustoimintonsa yksittäisen toiminnon tai laitteen vikaantumisesta huolimatta. Vikakriteerin (N+2) täyttävä järjestelmä voi suorittaa halutun turvallisuustoiminnon kahden laitteen epäkäytettävyydestä huolimatta. Eri toimintoa suorittaville järjestelmille määritellään STUK:n YVL B.1 -ohjeessa vikakriteerit, jotka niiden tulee täyttää. (YVL B.3)
Järjestelmän turvallisuustoiminto vaikuttaa sen yksittäisvikakriteeriin ja sitä kautta käyttötilakohtaisiin vaatimuksiin sekä käyttötilanehtoon. (Fortum, 2023b) Käyttötilanehtojen määrittelemisen perusteiden luominen aloitettiin perehtymällä kolmeen eri turvallisuusjärjestelmään ja niiden vaatimuksiin käyttötiloittain. Käyttötilanehtojen määrittelyä varten järjestelmien vaatimuksista etsittiin yhteneväisyyksiä ja eroavaisuuksia.

5.1 Esimerkkijärjestelmät

Tutkimukseen valitut kolme järjestelmää ovat suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmä, hätädieselgeneraattorit ja laitossuojausjärjestelmä. Suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmä toimii osana hätälämmönsiirtoketjua ja suojarakennuksen jäähdytystä. Hätädieselgeneraattorit varmentavat laitoksen sähkösyöttöä ja muiden järjestelmien toimintaa. Laitossuojausjärjestelmän automaatio käynnistää kriittisiä turvallisuustoimintoja tilanteissa, joissa se havaitsee poikkeaman. (Fortum, 2024a)

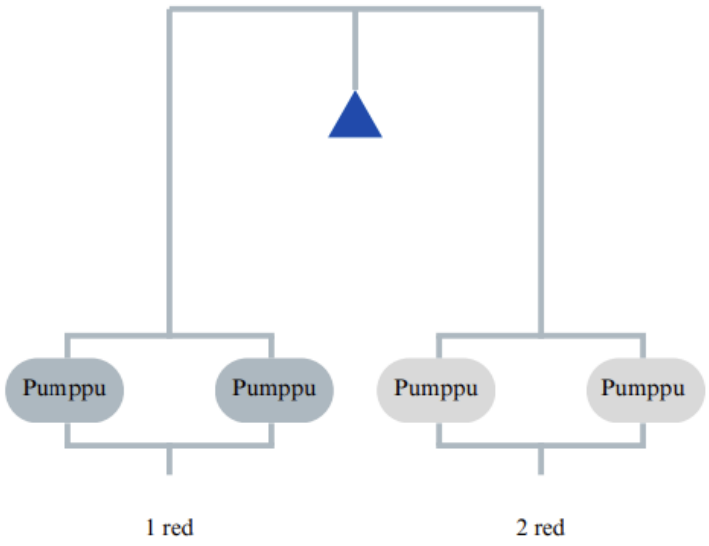
Esimerkkijärjestelmät valittiin työn tutkimuksen kohteiksi, koska ne toimivat eritavoin ja jokainen niistä toteuttaa turvallisuustoimintoa. Jokaiselle valituista järjestelmistä esitetään

kunnossaolovaatimuksia TTKE:n käyttörajoituksissa. Lisäksi järjestelmien korjaus- ja huoltotoimenpiteet pyritään ajoittamaan laitoksen seisokkiin ja niiden vaatimukset kiristyvät ylösajossa.

5.1.1 Suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmä

Ruiskutusjärjestelmä huolehtii suojarakennuksen jäähdyttämisestä jäähdytteenmenetysonnettomuudessa. Sen tarkoitus on jäähdyttää suojarakennusta sekä alentaa siellä vallitsevaa painetta. Lisäksi järjestelmän tarkoitus on pienentää radioaktiivisia pitoisuuksia suojarakennuksen ilmassa sitomalla aktiivisuutta jäähdytysveteen. (Fortum, 2024a)

Järjestelmä koostuu kahdesta redundanssista, joista molemmissa on kaksi pumppua. Järjestelmälle ei ole vaatimuksia lataus- ja kylmäseisokissa. Primääripiirin paine ja lämpötila pysyvät alhaisina, joten järjestelmän turvallisuustoiminnolle ei ole tarvetta näissä käyttötiloissa. (Fortum, 2015)

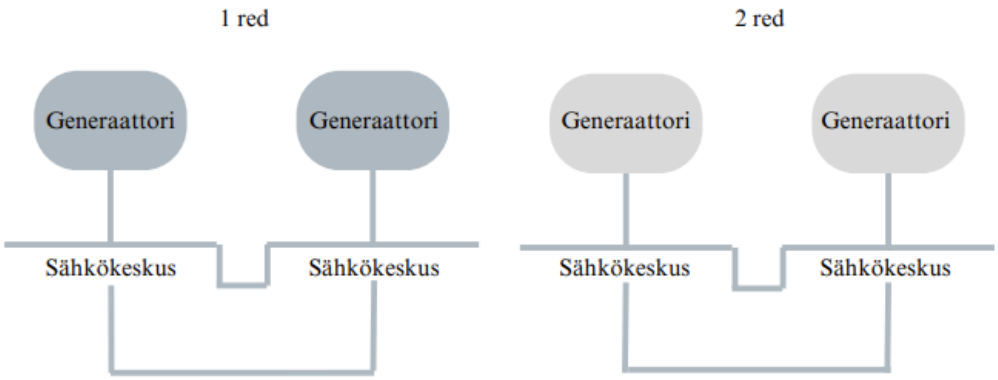


Kuva 3. Suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmä (Fortum, 2015 mukaillen)

Ylösajossa kuumaseisokkiin siirryttäessä ruiskutusjärjestelmä otetaan käyttövalmiuteen. Järjestelmän molemmissa redundansseissa tulee olla yhdet toimivat pumput sekä kunnossa olevat putkilinjat, suuttimet ja lämmönvaihtimet. Käyntitiloissa järjestelmän vaatimukset tiukentuvat. Järjestelmän kaikkien laitteiden tulee olla käyttökunnossa molemmissa redundansseissa. Toisen redundanssin pumppua voidaan tarvittaessa korjata sallittujen poikkeuksien puitteissa, mikäli toinen pumppu on käyttökunnossa. (Fortum, 2024a)

5.1.2 Hätädieselgeneraattorit

Hätädieselgeneraattorien tarkoitus on tuottaa laitoksen turvallisuusjärjestelmille sähköä tilanteessa, jossa yhteys valtakunnan sähköverkkoon katkeaa. Hätädieselgeneraattoreita on kummallekin laitosyksikölle neljä ja ne on kytketty kahteen eri redundanssiin. Ne muodostavat toisistaan riippumattomat sähkölinjat, sähköneljännekset. Kunnossa olevalla hätädieselgeneraattorilla tulee olla siihen kohdistuvien vaatimusten lisäksi jännitteellinen ja käyttövalmiina oleva kytkinlaitos. Generaattoreilla tulee olla tarpeeksi polttoainetta ja niiden ilmastointijärjestelmien tulee olla kunnossa. (Fortum, 2024a)



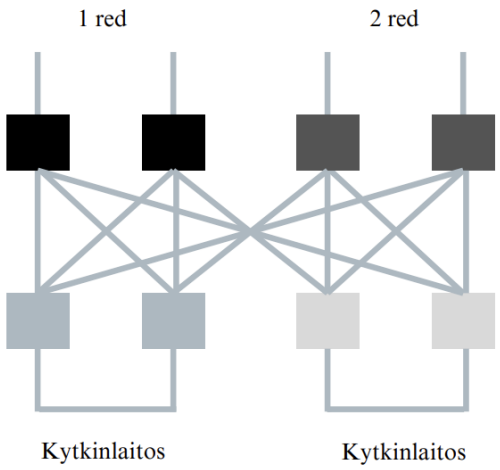
Kuva 4. Hätädieselgeneraattorit (Fortum, 1993 mukaillen)

Generaattoreihin kohdistuu jatkuvia kunnossaolovaatimuksia, sillä mahdollinen sähkönsyötön menetys on riippumaton laitoksen käyttötilasta. Lataus- ja kylmäseisokissa järjestelmältä vaaditaan kahden hätädieselgeneraattorin kunnossa oloa ja käynnistysvalmiutta. Kunnossa olevat hätädieselgeneraattorit voivat olla samasta redundanssista, mutta dieselvarmennus on kytkettävä osalle toisen redundanssin pumpuista. (Fortum, 2024a)

Ylösajossa kuumaseisokkiin siirryttäessä hätädieselgeneraattoreiden vaatimukset tiukentuvat siten, että kummassakin redundanssissa tulee olla automatiikkoineen ja apujärjestelmineen toimiva hätädieselgeneraattori käynnistysvalmiudessa. Käyntitiloissa vaaditaan kaikkien hätädieselgeneraattoreiden, kytkinlaitosten ja muuntajien kunnossa oloa. Sähkönsyötön tiukat perustilavaatimukset johtuvat turvallisuustoiminnoista, joita sillä varmennetaan. Generaattoreiden vaatimukset määräytyvät tiukimman sähkön syötöstä riippuvaisen turvallisuusjärjestelmän perustilavaatimusten mukaan. (Fortum, 2024a)

5.1.3 Laitossuojausjärjestelmä

Laitossuojausjärjestelmä seuraa turvallisuuden kannalta tärkeitä prosessiarvoja. Mikäli parametrien arvot poikkeavat sallitulta alueelta, järjestelmä käynnistää tarvittavan turvallisuustoiminnon automaattisesti. Esimerkiksi suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmä käynnistyy, jos paine nousee liian korkeaksi suojarakennuksen ylätilassa. Laitossuojausjärjestelmä myös pysäyttää ruiskutusjärjestelmän paineen laskiessa. (Fortum, 2023c) Laitossuojausjärjestelmän toiminnan raja-arvot on määritelty TTKE:ssa. Järjestelmän signaalikanavia on neljä ja ne ovat kahdessa redundanssissa. Lataus- ja kylmäseisokissa laitossuojausjärjestelmältä vaaditaan käytössä olevaan sähköneljännekseen liittyvän signaalikanavan kunnossa oloa. (Fortum, 2024a)



Kuva 5. Laitossuojausjärjestelmä (Fortum, 2023c mukaillen)

Kuumaseisokissa ja -valmiudessa turvallisuusjärjestelmien vaatimukset lisääntyvät. Laitossuojausjärjestelmän perustilavaatimuksissa määritellään, että vähintään yksi signaalikanava kummastakin redundanssista on käyttökunnossa. Signaalien tulee vastata käytössä olevia hätäsyöttövesijärjestelmän sekä laitoslisävedensyötön kanavia. Lisäksi tasajännitekiskojen jännitteiden, säiliöiden pinnan korkeuksien sekä reaktorin ulostulolämpötilan mittauksien tulee olla kunnossa. Käynnistystilassa ja tehokäytöllä vaaditaan kaikkien järjestelmän signaalikanavien käyttökuntoisuutta. Lisäksi laitossuojaussignaalien käynnistämät ohjelmat sekä välttämättömät apujärjestelmät tulee olla kunnossa. (Fortum, 2024a)

6 Perusteet käyttötilanehtojen määrittelemiseen käyttöpaikalla

Käyttötilanehdot halutaan määritellä TTKE:n vaatimusten mukaan turvallisuuden kannalta merkityksellisille järjestelmille. Ohjeet käyttötilanehdon määrittämiselle laaditaan ylösajotilanteen näkökulmasta. Seisokissa tehtävät työt ajoitetaan sen mukaan, milloin käyttökunnottomuutta aiheuttavien huoltotoimenpiteiden tekeminen sallitaan TTKE:ssa. Kyseiset työt täytyy saada valmiiksi ennen kuin laitos siirtyy sellaiseen käyttötilaan, jossa järjestelmän tulee olla kunnossa. Esimerkiksi käyttötilanehdon KUU omaavalla käyttöpaikalla työn tulee olla valmis kuumaseisokkiin siirryttäessä. (LOMAX, 2024)

Laitoksen järjestelmät voidaan jaotella kahteen osaan seisokkia varten. On järjestelmiä, joilla ei ole vaatimuksia kaikissa käyttötiloissa. Tällöin järjestelmän kunnossaolovaatimukset astuvat voimaan yleensä vasta ylösajon edetessä. Toiset järjestelmistä ovat sellaisia, joilla on vaatimuksia jatkuvasti. Seisokissa näiden järjestelmien ei yleensä tarvitse olla kaikilta osin kunnossa, sillä niitä tulee voida huoltaa. TTKE:n asettamat vaatimukset tiukentuvat pääsääntöisesti ylösajon edetessä ja järjestelmän kaikkien osien tulee olla käytettävissä ennen laitoksen käynnistämistä.

Käyttötilanehtoon vaikuttavat seuraavat asiat:

- Järjestelmälle on asetettu vaatimuksia niihin käyttötiloihin, joissa järjestelmän turvallisuustoimintoa tarvitaan. Mikäli järjestelmä toimii turvallisuustoiminnon apujärjestelmänä, sillä on vaatimuksia jokaisessa käyttötilassa, missä toimintoa edellytetään. Apujärjestelmän vaatimukset määräytyvät pääjärjestelmän vaatimusten mukaan.
- Järjestelmän turvallisuusmerkitys määrittelee siltä vaaditut erottelu-, erilaisuus- ja moninkertaisuusperiaatteet. Periaatteet määrittävät, mitä kunnossaolovaatimuksia järjestelmälle on voitu asettaa.
- Järjestelmän rajaventtiilien ja -laitteiden kunnossaolon edellytykset tulee huomioida käyttötilanehtoa määriteltäessä.
- Käyttötilanehto määritetään myös sellaisille järjestelmille, joiden tulee olla jatkuvasti kunnossa kaikilta osiltaan ylösajotarkastusten tehostamiseksi.

6.1 Perusteet käyttötilanehtojen määrittelemiseen järjestelmälle, jolla ei ole vaatimuksia kaikissa käyttötiloissa

1. Järjestelmän käyttötilanehto on ensimmäinen ylösajossa vastaan tuleva käyttötila, jossa siltä tai sen osalta vaaditaan kunnossa oloa.
2. Käyttötilanehto määritetään kaikille järjestelmän osille, joita sen toimintakunto edellyttää. Käyttötilanehto määritellään myös apujärjestelmille, joita järjestelmän toiminta edellyttää.
3. Käyttötilanehto tulee määrittää järjestelmään yhdistyvien toisen järjestelmän linjojen rajaventtiileille ja -laitteille. Rajakomponentin käyttötilanehto tulee määrittää sen järjestelmän mukaan, jonka käyttötilanehto tulee vastaan aikaisemmin ylösajossa.
4. Käyttötilanehto on sama järjestelmän jokaiselle redundanssille ja linjalle.

6.2 Perusteet käyttötilanehtojen määrittelemiseen järjestelmälle, jolla on vaatimuksia jokaisessa käyttötilassa:

1. Käyttötilanehto määritetään kaikille järjestelmän osille, joita sen toimintakunto edellyttää. Käyttötilanehto määritellään myös apujärjestelmille, joita järjestelmän toiminta edellyttää.
2. Käyttötilanehto tulee määrittää järjestelmään yhdistyvien toisen järjestelmän linjojen rajaventtiileille ja -laitteille. Rajakomponentin käyttötilanehto tulee määrittää sen järjestelmän mukaan, jonka käyttötilanehto tulee vastaan aikaisemmin ylösajossa.
3. Mikäli järjestelmän osan tai osien tulee olla jatkuvasti kunnossa, käyttötilanehdoksi määritetään AINA.
4. Järjestelmän eri linjoille voidaan määrittää tarvittaessa eri käyttötilanehto. Yksittäisen linjan tai kanavan käyttötilanehto on kuitenkin sama jokaisen laitteen osalta.

6.3 Käyttötilanehtojen tarkentaminen

Käyttötilana ilmaistu käyttötilanehto ei yksinään riitä havainnollistamaan järjestelmän vaatimuksia, mikäli järjestelmän osan tai osien tulee olla aina käytettävissä. LOMAX:sta puuttuu käyttötilanehto sellaisille käyttöpaikoille joiden tulee olla käytettävissä aina kaikilta osiltaan. Tällaisia käyttöpaikkoja varten järjestelmään tulisi lisätä uusi käyttötilanehto AINA. Käyttötilanehto tarvitaan, jotta ylösajotarkastusten seulontaa saadaan tehostettua.

Järjestelmän kanaville tai linjoille täytyy määrittää eri ehtoja, jos ne ovat identtisiä ja jonkin niistä on oltava jatkuvasti käytettävissä. Koska järjestelmien huoltojärjestys vaihtelee seisokkikohtaisesti, järjestelmän tietylle linjalle tai redundanssille ei voida määrittää vuosittain toistuvaa ajanhetkeä, jolloin sitä huolletaan. Ylösajotarkastusten työmäärän vähentämiseksi käyttöpaikoille halutaan kuitenkin määrittää käyttötilanehto, jonka avulla käyttötilanvaihdon esteenä olevat avoimet työmääräimet voidaan hakea LOMAX:sta suoraan.

LOMAX:ssa voidaan tällä hetkellä määrittää käyttötilanehdoksi redundanssin vaihto (RED). (LOMAX, 2024) Tällä ehdolla olisi mahdollista merkitä ensimmäisenä huollettavan redundanssin töitä. Ehto tarkoittaa sitä, että käyttöpaikan tulee olla käyttökunnossa ennen kuin toisessa redundanssissa aloitetaan käyttökunnottomuutta aiheuttavien töiden tekeminen. Jälkimmäisenä huoltovuorossa olevan redundanssin työn suoritusaikaa ehto ei kuitenkaan rajaa. Sitä ei voida hyödyntää tilanteessa, jossa keskeneräinen työ estää laitoksen ylösajon.

Sähköjärjestelmien huolto tehdään seisokissa neljänneksittäin ensin toiseen redundanssiin ja sitten toiseen. LOMAX:sta löytyy myös merkintä sähköneljänneksen vaihto (1/4). (LOMAX, 2024) Käyttötilanehto tarkoittaa, että käyttöpaikalle kohdistuvien töiden tulee olla valmiita ennen kuin toiseen neljännekseen kohdistuvien epäkäytettävyyttä aiheuttavien töiden tekeminen aloitetaan. Kyseisen ehdon käyttämisessä ilmenee sama ongelma, kuin redundanssin vaihdon kanssa. Käyttötilanehto ei rajaa viimeisenä huoltovuorossa olevan sähköneljänneksen töiden suoritusajankohtaa. Sähköjärjestelmät huolletaan siten, että TTKE:n vaatimukset kunnossa olevien sähköneljännesten määrästä täyttyy. Jokaisen sähköneljänneksen alaisen järjestelmän tulee olla käytettävissä, jotta neljännes on käyttökunnossa.

Tällä hetkellä käyttötilanehto on kolmimerkkinen merkintä laitostietokannassa. Käytännössä käyttötilanehto on ilmaistu käyttötilana, redundanssin vaihtona tai sähköneljänneksen vaihtona. (LOMAX, 2024) Nykyiset laitostietokannasta löytyvät käyttötilanehdot eivät kuitenkaan riitä havainnollistamaan järjestelmän vaatimuksia tilanteessa, jossa sen osan tai osien tulee olla aina kunnossa.

Käyttötilanehdon merkkimäärää kasvattamalla siihen voitaisiin lisätä tietoa, joka havainnollistaisi järjestelmään kohdistuvia vaatimuksia tarkemmin. Käyttötilanehtoa voitaisiin tarkentaa lisäämällä siihen sähköneljännes (1/4, 2/4, 3/4 ja 4/4). Tällöin käyttöpaikan käyttötilanehdon lisäksi neljännes rajaisi tarkemmin tehtävän työn suoritusaikaa. Esimerkiksi KUV 1/4 -merkinnän omaava työ tulee saada valmiiksi ennen kuumavalmiutta. Lisäksi järjestelmän linja kuuluu ensimmäiseen sähköneljännekseen. Linjaan kohdistuvat epäkäytettävyyttä aiheuttavat työt tulee suorittaa samaan aikaan silloin, kun linja on pois käytöstä. Toisin sanoen järjestelmän tulee olla käyttökunnossa, kun ensimmäinen sähköneljännes on käytössä ja viimeistään kuumavalmiustilassa. Mikäli järjestelmän tulee olla kunnossa kaikilta osiltaan jatkuvasti, sen käyttötilanehdoksi määritellään AINA.

6.4 Esimerkkijärjestelmien käyttötilanehdot

Suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmän vaatimukset astuvat voimaan ylösajon edetessä. Järjestelmän molempien redundanssien tulee olla käytössä, kun laitos ajetaan kuumaseisokkiin. Järjestelmän kaikille linjoille määritellään KUU- merkintä käyttötilanehdoksi. Näin LOMAX antaa järjestelmän käyttöpaikoihin kohdistuville työmääräimille käyttötilanehdoksi kuumaseisokin. TTKE:ssa sallitaan toisen pumpun huoltaminen molemmissa redundansseissa kuumavalmiustilaan saakka. Mikäli järjestelmään kohdistuu töitä ylösajossa vielä kuumaseisokissa, yksittäisen työmääräimen käyttötilanehto voidaan vaihtaa myöhemmin manuaalisesti kuumavalmiustilaan tarpeen mukaan.

Hätädieselgeneraattoreilla on kunnossaolovaatimuksia laitoksen jokaisessa käyttötilassa. Järjestelmä koostuu kahdesta redundanssista ja neljästä eri sähköneljänneksestä. Kaikkien dieseleiden käyttökuntoa vaaditaan, kun laitos ajetaan kuumavalmiustilaan. Tämä määrittää hätädieselgeneraattoreille KUV-käyttötilanehdon. Merkintä ei kuitenkaan kerro vaatimuksista, joita järjestelmään kohdistuu ennen kuumavalmiustilaa.

Hätädieselgeneraattoreiden käyttötilanehto- merkintään voitaisiin lisätä kehitysehdotuksen mukaan sähköneljänneksen numero. Näin ehto rajaisi käyttöpaikoille kohdistuvien töiden suoritusajankohtaa neljänneksittäin. Ehdotuksen mukaan, järjestelmän käyttötilanehdoksi asetetaan KUV1/4 - KUV4/4. Tämä tarkoittaa, että kyseiseen järjestelmään ei saa kohdistaa käyttökunnottomuutta aiheuttavia töitä, kun järjestelmän sähköneljännes on käytössä. Järjestelmän tulee olla toimintakunnossa viimeistään laitoksen siirtyessä kuumavalmiuteen.

Laitossuojausjärjestelmän kanaviin kohdistuu eri vaatimuksia. Toimintavalmiudessa olevien hätädieselgeneraattoreiden sähköneljänneksen kuormien pudotuksen ja jälleen kytkennän kanavien tulee olla kunnossa koko ajan. Perusteiden mukaan kyseisille signaalikanaville ei määritetä LAT -käyttötilanehtoa, sillä niiden tulee olla toiminnassa aina. Koska vaatimus ei kohdistu kaikkiin kanaviin, käyttötilanehdoksi määritellään pelkkä sähköneljännes. Näin käyttötilanehto rajaa signaalikanaviin kohdistuvien töiden suoritusaikaa sähköneljänneksen mukaan.

TTKE:ssa on määritetty signaalikanavat sekä mittauksia, joiden osalta yhden kanavan tulee olla kunnossa kuumaseisokista eteenpäin. Näiden signaalikanavien osalta käyttötilanehdoksi määritellään KUU ja sähköneljännes. Loppujen laitossuojausjärjestelmän kanavista tulee olla toimintakunnossa käynnistystilassa. Näiden käyttötilanehdoksi määräytyy KÄT.

Taulukko 2. Käyttötilanehdot esimerkkijärjestelmillä

Järjestelmä	Suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmä	Hätädieselgeneraattorit	Laitossuojausjärjestelmä
Vaatimukset	Vaatimuksia kuumaseisokista eteenpäin	Vaatimuksia aina	Osalle signaaleista vaatimuksia aina
Käyttötilanehdot	KUU	KUV + 1/4 - 4/4	1/4 - 4/4
			KUU + 1/4 - 4/4
			KÄT

7 Johtopäätökset

Työssä perehdyttiin asiakirjojen pohjalta laitoksen turvallisuusjärjestelmiin sekä niiden toimintaan. Lisäksi laitoksen turvallisuusinsinöörejä haastateltiin käyttötilanehtojen määrittelemistä koskevien perusteiden luomista varten. Ylösajotarkastuksia tekevien henkilöiden näkemyksen avulla perusteista pyrittiin saamaan sellaiset, että ne vastaavat mahdollisimman hyvin toimeksiantajan tarpeeseen.

Tutkimuksen pohjalta syntyneet perusteet ovat pääkohtia käyttötilanehtojen määrittämiselle. Työn tulos on sille asetettujen tavoitteiden mukainen ja sitä on mahdollista kehittää käyttötilanehtojen määrittelyn edetessä. Järjestelmien käyttöpaikkojen läpikäynnissä voi ilmetä yksityiskohtia, joiden takia perusteita täytyy tarkentaa. Järjestelmän käyttötilanehto määräytyy siihen kohdistuvien vaatimusten mukaan. Jotta käyttöpaikalle voidaan määrittää käyttötilanehto, sen vaatimusten turvallisuusmerkitys tulee ymmärtää.

Työn tuotoksena syntyneiden perusteiden avulla käyttötilanehdot voidaan määritellä laitoksen käyttöpaikoille. Käyttötilanehtoa määriteltäessä huomioidaan järjestelmän vaatimukset ja sen turvallisuustoiminnon merkitys. Käyttötilanehto määritetään kaikille järjestelmän osille ja apujärjestelmille, joita sen toimintakunto edellyttää. Järjestelmien välisten rajakomponenttien käyttötilanehto määräytyy sen järjestelmän mukaan, jonka käyttötilanehto astuu aikaisemmin voimaan ylösajossa. Jos järjestelmään kohdistuu jatkuvia vaatimuksia, sen linjoille voidaan määrittää eri käyttötilanehto. Yksittäisen linjan tai kanavan laitteille määritettävän käyttötilanehdon tulee kuitenkin olla sama. Mikäli järjestelmän vaatimukset astuvat voimaan ylösajon edetessä, käyttötilanehto on sama koko järjestelmälle.

Työssä nousi esiin tarve kehittää laitostietokannan käyttötilanehtoja. LOMAX:n käyttötilanehtojen määritelmät eivät ole tällä hetkellä riittävät ilmaisemaan järjestelmiin kohdistuvia vaatimuksia. Kolmimerkkinen käyttötilanehto-merkintä tarvitsisi lisätietoja, jotta se rajaisi työn suoritusaikaa sellaisten järjestelmien osalta, joilla on jatkuvia kunnossaolovaatimuksia. Kun käyttötilanehtoon lisätään käyttöpaikan linja, töidensuoritusaikaa voidaan rajata tarkemmin. Tällöin käyttötilanehto rajaa käyttöpaikalle kohdistuvien töiden suoritusajan siihen hetkeen, kun kyseinen linja on epäkunnossa. Lisäksi käyttötilanehto kertoo mihin

käyttötilaan siirryttäessä käyttöpaikan tulee olla käyttökunnossa. Mikäli järjestelmän tulee olla kaikilta osiltaan aina kunnossa, sille määritellään käyttötilanehdoksi AINA.

Määritetty käyttötilanehto näkyy laitostietokannassa kaikilla kyseiselle käyttöpaikalle kohdistuvilla työmääräimillä. Tämä nopeuttaa laitoksen ylösajotarkastuksia. Aikaisemmin avoimien työmääräinten läpikäynti on hoidettu ylösajotarkastuksissa manuaalisesti. Turvallisuusinsinööri on etsinyt laitostietokannasta sellaiset keskeneräiset työt, jotka ovat käyttötilanvaihdon esteenä. Laitoksen seisokkiin ajoitetun suuren työmäärän takia ylösajossa priorisoidaan keskeneräisiä töitä kiireellisyyden mukaan. Ylösajojärjestyksessä seuraavaan käyttötilaan voidaan edetä vasta, kun työt saadaan valmiiksi sellaisten käyttöpaikkojen osalta, joille on asetettu kunnossaolovaatimuksia seuraavana olevaan käyttötilaan.

Määritellyn käyttötilanehdon ansiosta laitostietokannasta saadaan haettua kaikki käyttötilanvaihdon esteenä olevat avoimet työmääräimet. Tämä vähentää turvallisuusinsinöörien manuaalista työtä ja helpottaa kiireellisten töiden priorisointia. Myös inhimillisen virheen riski pienenee, kun manuaalisesti tehtävän työn määrä vähenee.

Järjestelmälle määritelty käyttötilanehto sujuvoittaa laitoksen kunnossapidon työskentelyä. Se helpottaa töiden ajoitusta ja käytössä olevat työtekijäresurssit voidaan kohdentaa kriittisille töille. Ylösajon edetessä käyttötilanvaihtoja saadaan tehostettua, kun määritellyn ehdon ansiosta aikaa ei kulu manuaaliseen etsintään. Näin töiden valmistelu sujuu nopeammin ja käytettävissä oleva aika saadaan kohdistettua tehokkaammin. Työt pystytään suorittamaan oikeaan aikaan, kun työlistan läpikäymiseen kuluu vähemmän aikaa.

Työn aiheesta on rajattu pois ennakkohuoltojen käsittely. Syntyneitä perusteita on kuitenkin mahdollista soveltaa myös niihin. Tällöin on selvitettävä, täytyykö käyttötilanehtojen määrittelyssä huomioida vielä muita perusteiden ulkopuolelle jääneitä seikkoja. Työssä ei käsitelty myöskään sellaisten järjestelmien vaatimuksia, jotka ovat yhteisiä kummallekin laitosyksikölle. Tämä johtuu siitä, että lähtökohtaisesti toinen laitosyksikkö on tehokäytöllä samaan aikaan kun toista ajetaan ylös. Työn jatkotarkasteluna voitaisiin perehtyä siihen, kuinka ennakkohuolloille ja laitosyksiköiden yhteisille turvallisuusjärjestelmille tulee määrittää käyttötilanehto. Työn pohjalta voidaan tehdä myös jatkotutkimus, jossa turvallisuusjärjestelmille määritetään käyttötilanehdot alasajoa varten.

8 Yhteenveto

Työn tutkimustulos perustuu kolmeen esimerkkijärjestelmään ja niiden turvallisuusvaatimuksiin laitoksen ylösajossa. Tutkimuksen kohteeksi valittiin järjestelmiä, joiden kunnossaolovaatimukset eroavat. Tällä pyrittiin saamaan mahdollisimman kattava tutkimusaineisto, jonka pohjalta työn perusteiden luominen aloitettiin.

Käyttötilanehdon määrittämiseen vaikuttavat järjestelmän turvallisuusvaatimukset. Ehto tulee määrittää kaikille järjestelmän osille, apujärjestelmille ja järjestelmän rajakomponenteille. Mikäli järjestelmän kunnossaolovaatimukset ovat jatkuvia, sen linjoille voidaan määrittää eri käyttötilanehto. Tällöin tulee tietää, mihin redundanssiin ja neljännekseen käyttöpaikka kuuluu. Jos taas järjestelmän vaatimukset astuvat voimaan ylösajon edetessä, käyttötilanehto asetetaan samaksi koko järjestelmälle, ensimmäiseen käyttötilaan, missä sille on asetettu vaatimuksia.

Laitostietokannan käyttötilanehtoja on mahdollista kehittää siten, että ne rajaavat työn suoritusaikaa tarkemmin. Tämä onnistuu, kun käyttötilanehtoon lisätään järjestelmän linja tai sähköneljännes. Tarkennettu käyttötilanehto ilmaisee minkä linjan huollon aikana siihen voidaan kohdistaa käyttökunnottomuutta aiheuttavia töitä ja mihin käyttötilaan siirryttäessä käyttöpaikan tulee olla kunnossa.

Laitoksen turvallisuusjärjestelmien käyttötilanehtojen määrittely tehdään työssä syntyneiden perusteiden avulla. Näin käyttöpaikkojen käyttötilanehdot voidaan määritellä yhtenevillä periaatteilla. Määriteltyjen käyttötilanehtojen avulla voidaan tehostaa ajankäyttöä ylösajotarkastuksissa. Lisäksi ne helpottavat töiden priorisointia laitoksen ylösajon aikana.

Työn tulos vastaa esimerkkijärjestelmien vaatimuksiin. Se ei kuitenkaan ole täydellinen, sillä tutkimustuloksena syntyneet perusteet on luotu esimerkkijärjestelmien pohjalta. Tämän takia perusteet eivät välttämättä huomioi kaikkien turvallisuusjärjestelmien vaatimuksia. Käyttötilanehtojen määrittelyn edetessä järjestelmien vaatimuksissa voi ilmetä yksityiskohtia, joiden takia tutkimustuloksena syntyneitä perusteita täytyy tarkentaa.

Toimeksiantajan toiveena on tehdä jatkotutkimus työn pohjalta. Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, soveltuuko työn tulos käyttötilanehtojen määrittämiseen ennakkohuolloille. Tutkimuksessa olisi tarkoitus kehittää käyttötilanehtojen määrittelemisen perusteita, mikäli

niiden tarkentaminen olisi tarpeen ennakkohuoltojen käsittelyä varten. Työn pohjalta syntyviä jatkotutkimusaiheita ovat myös laitosten yhteiset järjestelmät sekä käyttötilanehtojen merkitys laitoksen alasajossa.

Lähteet

Andrews, J., Jelley, N. 2013. Energy Science: principles, technologies and impacts. Oxford: Oxford University Press. ISBN 978-0-19-959237-1.

Eurasto, T., Hyvärinen, J., Järvinen, M., Sandberg, J., Sjöblom, K. 2004. Ydinvoimalaitostekniikan perusteita. Teoksessa: Säteily- ja ydinturvallisuus. Ydinturvallisuus/J. Sandberg. Hämeenlinna: Karisto Oy. ISBN 951-712-507-0. [Viitattu 18.1.2024]. Saatavissa: https://stuk.fi/documents/150192312/162661266/kirja5-2-ydinturvallisuus-ydinvoimalaitostekniikan-perusteita.pdf/ba267240-11ef-b9f2-4c1a-c3763c2627a0/kirja5-2-ydinturvallisuus-ydinvoimalaitostekniikan-perusteita.pdf?t=1684851457113

Fortum, 2024a. LO1 TTKE. Fortum Power and Heat Oy. [Ei julkinen]

Fortum, 2024b. LO2 TTKE. Fortum Power and Heat Oy. [Ei julkinen]

Fortum, 2023a. Sanasto. Fortum Power and Heat Oy. [Ei julkinen]

Fortum, 2023b. Laitteiden, järjestelmien ja rakenteiden luokitus. [Ei julkinen]

Fortum, 2023c. Laitossuojausjärjestelmä. Fortum Power and Heat Oy. [Ei julkinen]

Fortum, 2022. Tervetuloa töihin. Fortum Power and Heat Oy. [Ei julkinen]

Fortum, 2021. Jälkilämmönpoistojärjestelmä. Fortum Power and Heat Oy. [Ei julkinen]

Fortum, 2015. Suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmä. Fortum Power and Heat Oy. [Ei julkinen]

Fortum, 1994. TTKE perusteet. Fortum Power and Heat Oy. [Ei julkinen]

Fortum, 1993. Dieselsähköjärjestelmä. Fortum Power and Heat Oy. [Ei julkinen]

Honkala, R., 1985. Käyttäjän käsikirja 1. Reaktori. Imatran Voima Oy. [Ei julkinen]

IAEA, 2000. Operational limits and conditions and operating procedures for nuclear powerplant. Safety Guide. [Turvallisuusohje]. [Viitattu 22.12.2023]. Saatavissa: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1100_scr.pdf

Inkinen, O., 2023. Turvallisuustekniset käyttöehdot. Ydinturvallisuus- ja ydinjätehuoltokurssi. Luento 5.2_2. Simo Verta. [Ei julkinen]

Jevremovic, T., 2009. Nuclear Principles in Engineering. ISBN 978-0-387-85607-0.

Koutaniemi, P., Reponen, H., Salminen, P., Sandberg, J,. Varjoranta T. 2004. Ydinenergialainsäädäntö ja hallinto. Teoksessa: Säteily- ja ydinturvallisuus. Ydinturvallisuus/J. Sandberg. Hämeenlinna: Karisto Oy. ISBN 951-712-507-0. [Viitattu 19.1.2024]. Saatavissa: https://stuk.fi/documents/150192312/162661266/kirja5-9-ydinturvallisuus-lainsaadanto.pdf/c314df34-40c2-af21-a9a2-5ebdbe5c611b/kirja5-9-ydinturvallisuus-lainsaadanto.pdf?t=1684851461331.

L 11.12.1987/990. Ydinenergialaki. Annettu 11.12.1987.

LOMAX, 2024. [Toiminnanohjausjärjestelmä]. [Ei julkinen]

Marttila, O., Isola, A., Spring, E., Vuorinen, A. 1971. Säteily: sen käyttö ja valvonta. Helsinki: Tammi.

STUK, n.d.a. Ydinvoimalaitoksen toiminta. [Verkkosivu]. [Viitattu 25.3.2024]. Saatavissa: https://stuk.fi/ydinvoimalaitoksen-toiminta

STUK, n.d.b. Turvallisuusperiaatteet. [Verkkosivu]. [Viitattu 25.1.2024]. Saatavissa: https://stuk.fi/turvallisuusperiaatteet

TEM, n.d. Ydinenergia-alan hallinto. Ydinenergialainsäädäntö. Työ- ja elinkeinominiteriö. [Verkkosivu]. [Viitattu 19.1.2024]. Saatavissa: https://tem.fi/ydinenergialainsaadanto

WNA, 2024. Physics of Uranium and Nuclear Energy. [Verkkosivu]. [Viitattu 15.4.2024]. Saatavissa: Physics of Uranium and Nuclear Energy - World Nuclear Association (world-nuclear.org)

WNA, 2023. Plutonium. [Verkkosivu]. [Viitattu 25.3.2024]. Saatavissa: https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/plutonium

WNA, 2021. Nuclear Fuel and its Fabrication. [Verkkosivu]. [Viitattu 10.4.2024]. Saatavissa: https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/fuel-fabrication.aspx

Y/1/2018. STUK. Säteilyturvakeskuksen määräys ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta. [Määräys]. [Viitattu 2.3.2024]. Saatavissa: https://www.stuklex.fi/fi/maarays/stuk-y-1-2018

YEA 12.2.1988/161. Ydinenergia-asetus. Annettu 12.2.1988.

YVL A.6. Ydinvoimalaitoksen käyttötoiminta. Annettu 15.6.2019. [Ydinturvallisuusohje]. [Viitattu 14.2.2024]. Saatavissa: https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLA-6

YVL A.7. Ydinvoimalaitoksen todennäköisyysperusteinen riskianalyysi ja riskien hallinta. Annettu 15.2.2019. [Ydinturvallisuusohje]. [Viitattu 14.2.2024]. Saatavissa: https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLA-7

YVL B.3. Ydinvoimalaitoksen deterministiset turvallisuusanalyysit. Annettu 2.9.2019. [Ydinturvallisuusohje]. [Viitattu 10.4.2024]. Saatavissa: https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLB-3