



**LOVIISAN YDINVOIMALAITOKSEN HÄTÄDIESELENNAKKOHUOLLON
TURVALLISUUSOPTIMOINTI**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energieatekniikka

2022

Dipl.-Ing. (FH) Jens Hartmann

Tarkastajat: Professori, TkT Juhani Hyvärinen

DI Timo Eurasto

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Dipl.-Ing (FH) Jens Hartmann

Loviisan ydinvoimalaitoksen hätädieselekkohuollon turvallisuusoptimointi

Diplomityö

2022

Tarkastaja: Professori, TKT Juhani Hyvärinen ja DI Timo Eurasto

Ohjaaja: DI Timo Eurasto

77 sivua, 17 kuvaa, 7 taulukkoa ja 7 liitettä

Hakusanat: ydinvoima, PRA, diesel huolto, turvallisuus, optimointi

Diplomityön tavoite on optimoida Loviisa ydinvoimalaitoksen hätädieseleiden EY01-04 ennakkohuoltotöiden tekemisen ajankohtaa vuosihuollon ja käyntijakson välillä. Tällä hetkellä hätädieseleiden epäkäytettävyyttä aiheuttavat ennakkohuollot tehdään vuosihuollossa. Ennakkohuollot on paketoitu neljään eri laajuiseen ja pituiseen kokonaisuuteen ns 1-vuotis, 2-vuotis-, 4-vuotis- ja 8-vuotishuoltoihin. Dieseleiden kaikkien epäkäytettävyyttä aiheuttavien ennakkohuoltojen tekeminen vuosihuollossa vaikuttaa merkittävästä turvajärjestelmien sähkösyöttöön, muiden järjestelmien huoltotöihin ja henkilöresurssien käyttöön.

Todennäköisyysperusteisen riskianalyysin (PRA) mukaan sydänvauriotaajuudesta lähes puolet tulee vuosihuollon aikaisista riskeistä. Mikäli osa hätädieseleiden ennakkohuolloista voitaisiin tehdä pienemmällä riskillä käynnin aikana niin sähkönsyöttö vuosihuollossa olisi turvampaa, se vapauttaisi kunnossapidon ja käytön resursseja muihin tehtäviin.

Diplomityön pohjalta Loviisan voimalaitos tekee erillisen päätöksen lähdetäänkö hakemaan muutosta ennakkohuolto-ohjelmaan viranomaiselta.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology

School of Energy Systems

Energy Technology

Dipl.-Ing. (FH) Jens Hartmann

Safety Optimizing of the Preventive Maintenance for Diesel Generators for the Nuclear Power Plant of Loviisa

Master's thesis

2022

Examiners: Professor, D.Sc. (Tech) Juhani Hyvärinen and M.Sc. Timo Eurasto

Supervisor: M.Sc. Timo Eurasto

77 pages, 17 figures, 7 tables, and 7 appendices

Keywords: nuclear power, PRA, diesel maintenance, safety, optimization

The objective of this master's thesis is to optimize the preventive maintenance for the Emergency Diesel Generators (EDG) EY01-04 of the nuclear power plant of Loviisa, by examining the possible execution during different plant states. At the moment, the unavailability of the EDG is caused by the preventive maintenance during the yearly outages. The preventive maintenance is done in four different maintenance packages (1-year, 2-year, 4-year, and 8-year) and a complete change every 16 years.

Carrying out the preventive maintenance during the outage has a significant impact on the security of the power supply for the safety systems, the maintenance of other systems, and human resources.

According to the Probabilistic Risk Analysis (PRA), the risk for core damages arises nearly half from the outage time. Therefore carrying out the preventive maintenance partly or entirely during power operation might be safer and makes maintenance resources available for other tasks during the outages.

Based on the outcome of this Master's Thesis a decision is made to apply for a change of the maintenance planning from the authorities.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

ESIPUHE

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Tausta, tarve ja laajuus	6
1.2	Arviointitapa	8
1.3	Diplomityön rakenne	8
2	YLEISKUVA	10
2.1	Laitoksen kuvaus	10
2.2	Ydinfysiikka.....	13
2.3	Turvallisuusperiaatteet.....	15
2.4	KZ-Järjestelmä	18
2.5	Sähköjärjestelmät	19
2.5.1	Sähköjärjestelmien arkkitehtuuri	20
2.5.2	Dieselvarmennetut sähköjärjestelmät	21
2.5.3	Ahvenkosken voimalaitos.....	23
2.6	Laitoksen vakiotilat	24
2.7	Kunnossapitokonsepti.....	25
2.8	Onnettomuuksien alkutapahtumat.....	26
2.9	Hätädieseilleitä koskevat lait, säännökset ja suositukset.....	26
3	HÄTÄDIESELEIDEN ENNAKKOHUOLTO	30
3.1	Ennakkohuolto-ohjelmat.....	30
3.2	Ennakkohuollon toimet ja tilastollinen arviointi	32
3.3	Dieselvian deterministinen arviointi	34
3.4	Dieseiden ennakkohuolto Saksassa	35
3.4.1	esi-KONVOI-tyyppisen laitoksen käytännöt.....	38
3.4.2	KONVOI-kohtainen käytäntö	38
4	TODENNÄKÖISYY SARVIINTI.....	40
4.1	Taustaa.....	40
4.1.1	Laitoksen tehokäyttötilat ja PRA-tulokset.....	41
4.1.2	Laitoksen seisokkitilat	42
4.1.3	Diesel järjestelmät	42
5	TULOKSET	43
5.1	Vaihtoehdot.....	43
5.2	PRA arvot vaihtoehdoille	44
5.3	Vaihtoehtojen käsittely ja tulokset	45

6	EHDOTUKSET.....	51
6.1	TTKE Muutokset.....	51
6.1.1	Dieselgeneraattorit ja -koneet	51
6.1.2	Dieselkiskot	52
6.2	Edellytykset.....	52
7	YHTEENVETO JA NÄKYMÄ.....	59

LIITTEET

Liite 1 Sähköjärjestelmien yhteyskaavio

Liite 2 Loviisan voimalaitoksen KZ-vihko

Liite 3 Kunnossapidonkonseptikaaviot (Riekkinen, 2021 ss. 6, 10)

Liite 4 Todennäköisyyden muutokset

Liite 5 Yksityiskohtaiset tulokset

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

f	aikatekijä
$P()$	todennäköisyys
P	teho
S	loisteho
V	jännite

Kreikkalaiset

τ	reaktorin periodi
--------	-------------------

Alaindeksit

0	nimellis-
max	maksimi-
svp	syöttövesipumppu
th	terminen
vmk	varamagnetointikone

Lyhenteet

AHV	Ahvenkosken Voimalaitos
DGLR	Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (Saksan ilmailu- ja astronautiikkayhdistys)
EDG	Emergency Diesel Generator (häädieselgeneraattori)
ERO	Erotus
EU	Euroopan unioni
EYT	Ei Ydinteknisesti Turvallisuusluokiteltu
FORDEC	Facts-Options-Risk-Decision-Execution-Check (päättösuunnitelma)
GEN	Generaattori
IAEA	International Atomic Energy Agency
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INPO	Institute of Nuclear Power Operations
KIS	Kisko

KON	Kone
KTA	Kerntechnischer Ausschuss (Ydintekninen komitea)
KWU	Kraftwerk Union (entinen Siemensin ja AEG:n Voimalaitosyksikkö)
(A)KZ	Anlagenkennzeichnungssystem (prosessimerkintäjärjestelmä)
LO, LOx	Loviisan Voimalaitos, yksikkö x
LOCA	Loss Of Coolant Accident
LOKS	Loviisa Koulutus Simulaattori
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
PRA	Probabilistic Risk Analysis
SGTR	Steam Generator Tube Rupture
STUK	Säteilyturvakeskus
suu	suunniteltu
tot	Toteutunut
TTKE	Turvallisuustekniset käyttöehdot
VVER	водо-водяной энергетический реактор (Vesi-Vesi Energia Reaktori)
WANO	World Association of Nuclear Operators
YVL	STUK:n ydinvoimalaitoksia koskeva ydinturvallisuusohjeisto

KZ

Bx	6 kV kisko
EY	Hätädieseljärjestelmä
SP	Generaattori
VF	Sivumerivesipiiri

ESIPUHE

*Humans are allergic to change.
They love to say, "We've always done it this way."
I try to fight that. That's why I have a clock on my wall that runs counter-clockwise.*
Grace Hopper (1906 - 1992)

Kun ammatillinen elämäni alkoi ydinteollisuudessa noin viisitoista vuotta sitten, kaikki näytti olevan kiveen hakattu ja vaikeaa tai mahdotonta muuttaa. Ydinvoiman käytön lopettamisesta Saksassa päätettiin jo vuosisadan alussa. Hienovarainen yritys muuttaa tätä päätöstä loppui lopulta Fukushima onnettomuuden myötä. Henkilökohtainen päätökseni muuttaa Suomeen oli looginen seuraus, mutta nyt myös jo kymmenen vuotta vanha. Tällä opinnäytetyölläni päättyvät kahden viimeisen vuoden maisteriopintoni Lappeenrannassa. Tämä ajanjakso antoi minulle mahdollisuuden nauttia opiskelijaelämästä uudelleen 13 vuoden työelämän jälkeen. Vaikka COVID-19-pandemia sitä hieman rajoitti. Kuitenkin melkein kahden ja puolen vuoden aikana opin viimeisimmän ydintekniikan ohella uuden kielen ja uuden tavan kirjoittaa. Koskaan ei ole liian myöhäistä oppia; koskaan ei ole liian myöhäistä muuttua.

Kiitokset

Haluan kiittää Loviisan ydinvoimalaitoksen henkilökuntaa avusta tässä opinnäytetyössä. Erityiskiitokset Timo Virtaselle hänen avustaan tiedon poimimisessa PRA-mallista. Lopuksi haluan kiittää ohjaajaani Timo Eurastoa kaikesta hänen antamastaan avusta ja erityisesti hänen uskomattomasta kärsivällisyydestään korjata kielivirheitäni, joita tein tätä opinnäytetyötä kirjoittaessani, mutta myös keskustelujen aikana.

Jens Hartmann, 2022-09-07

1 JOHDANTO

Energian, erityisesti sähköenergian kysyntä kasvaa nopeasti maailmanlaajuisesti. Ilmastokriisin kiihtymisen myötä kasvaa myös tarve saada vähän hiilidioksidia sisältävää energiaa ympäri vuorokauden. Ukrainan sota 2022 osoitti säästä riippumattoman, helposti varastoitavan ja turvallisen energialähteen tärkeyden demokraattisille maille.

Tuuli- ja aurinkoenergian määrä lisääntyy lähivuosina merkittävästi, mikä johtaa sähkön tuotannon merkittävään vaihteluun. Keskeytymätön ja taajuusvakaa sähköverkko on tuskin mahdollista ilman asianmukaista varastointitekniikkaa tai perinteistä sähkötuotantoa, kuten fossiili- tai biomassavoimaloita, ydin- ja vesivoimaloita. Näistä ydin- ja vesivoimalaitokset omaavat eniten säädettävyyttä, käytettävyyttä ja tuottavat vähiten hiilidioksidipäästöjä energiayksikköä kohti.

Vaikka energialähteitä tuulta ja aurinkoa voidaan käyttää ilman kunnollista varastointitekniikkaa, keskeytymätön ja taajuusvakaa syöttö kaikissa kuormitustilanteissa on tuskin mahdollista ilman perinteistä varmennusta, eli hallittavaa tuotantokomponenttia.

Tällä hetkellä vähiten hiilidioksidipäästöjä aiheuttava ja helposti varastoitavia teknologioita ovat vesi- ja ydinenergia. Vesivoimalaitokset vaativat jokia, joissa on riittävä virtaus-nopeus tai korkeusero. Ydinpolttoaine omaa suuren energiatiheuden ja on helppo varastoida. Lisäksi uraania on saatavilla poliittisesti vakaina demokraattisista maista kuten Australiasta ja Kanadasta.

Kuten kaikilla teknologioilla, myös ydinvoimalla on haittoja, kuten korkea-aktiivinen jäte ja mahdolliset onnettomuudet. Aiemmat kolme suurta onnettomuutta Harrisburgissa (1979), Tšernobylessä (1986) ja Fukushimassa (2011) ovat vahingoittaneet yleistä käsitystä ydinvoimaloiden luvatusista turvallisuudesta. Ydinvoimalaitosten turvallisuutta on jatkuvasti parannettava tutkimuksella, toimintatapoja kehittämällä ja parempaa teknologiaa käyttämällä. Tämä on myös YVL-ohjeiden lakisääteinen vaatimus.

1.1 Tausta, tarve ja laajuus

Ydinvoimalaitoksen turvallisuusjärjestelmät tarvitsevat huoltoa riippumatta siitä käytetäänkö niitä normaalin prosessin osana tai ei. Turvajärjestelmiä tarvitaan myös laitoksen ollessa pysäytettynä. Normaalit käyttöjärjestelmät, kuten primääripiirin

pääkiertopumput huolletaan yleensä kerran vuodessa vuosihuollossa. Joidenkin käyttöjärjestelmien huoltoja rajoittavat mm. säteily- ja prosessiolosuhteet. Todennäköisyyspohjaisella riskianalyysillä (PRA) on mahdollista arvioida johdonmukaisesti sitä, miten eri turvajärjestelmien huoltojen ajoitus käyttötilan ja vuosihuoltojen välillä vaikuttaa sydänvauriotaajuuteen.

YVL A.7 sanoo:

329 PRA:ta on käytettävä huoltoseisokkien, ydinpolttoaineen vaihtolatausseisokkien sekä niihin liittyvien käyttötilojen ja käyttötilojen välisten siirtymäjaksojen riskien hallintaan.[...] [2019-02-15]

Ydinvoimalaitoksen hätädieseljärjestelmien ennakkohuoltojen optimointi käyttötilojen ja vuosihuoltojen kesken on tärkeätä ja mahdollistaa turvallisuuden parantamisen sillä

- hätädieseiden turvallisuusmerkitys on suuri, neljän hätädieseljärjestelmän (EY01-04) yhtäaikainen epäkäytettävyys lisää riskiä sydämenauriononnettomuuteen 50 – 60 %.
- hätädieseileillä on käyttökuntoisuusvaatimuksia kaikissa laitostiloissa
- niiden huoltoja eivät rajoita säteily- ja prosessiolosuhteet
- laitoksen sydänvaurioiden taajuus jakautuu suunnilleen tasaisesti tehokäytön ja seisokkitilojen välillä
- sähkön tuotantovaihe vuodessa on yhdeksän kertaa pidempi kuin vuosihuoltoaika.

Tässä diplomityössä arvioidaan miten Loviisan voimalaitoksen hätädieselgeneraattoreiden EY01-04 ennakkohuoltojen optimaalisilla ajoituksilla voidaan pienentää sydänvaurion taajuudetta.

Loviisan voimalaitos on hakenut valtioneuvostolta lupaa jatkaa laitoksen käyttöä aina vuoteen 2050 asti. Tämä tarkoittaa, että hätädieseileille tullaan tekemään merkittävä määrä ennakkohuoltoja (nykyisellä ohjelmalla yli 200 kertaa), joten mahdollisilla muutoksilla on pitkällä ajalla suuri vaikutus.

1.2 Arviointitapa

Arviointitapa tässä diplomityössä noudattaa löyhästi FORDEC-mallia. Tämän järjestelmän on kehittänyt saksalainen lentoyhtiö Lufthansa yhdessä DGLR:n (Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Saksan ilmailu- ja astronautiikkayhdistys) kanssa. Se on järjestelmällinen työkalu päätöksen tekemiseen. Saksalaiset ydinvoimaloiden omistajat perustivat lentoyhtiö Lufthansan kanssa konsulttiyhtiön Human Performance-työkalujen jakamiseen ja kouluttamiseen. FORDEC-työkalua käytetään Saksan ydinvoimaloissa päätöksenteossa päävalvomoissa ja muissa päätöksentekotilanteissa. (Hörmann, 1994)

FORDEC on lyhenne sanoista: Facts, Options, Risks, Decision, Execution, Check.

Ongelmien ratkaisemisessa on tärkeää tiedostaa ongelman tosiasiat, sen jälkeen tunnistaa vaihtoehdot ja niiden riskit. Vasta sen jälkeen voi tehdä tietoon pohjautuvan päätöksen. Tärkeää tässä on tunnistaa mahdollisimman monia vaihtoehtoja, vaikka ne näyttävätkin mahdottomilta tai jopa absurdilta. Riskien käsittelyvaiheessa mahdottomat ajatukset rajautuvat pois. (VROM, 2008 s. 98)

Tässä opinnäytetyössä käsitellään tosiasiat, vaihtoehdot ja riskit. Päätökset mahdollisista toimenpiteistä tekee Loviisan voimalaitos.

1.3 Diplomityön rakenne

Tässä opinnäytetyössä arvioidaan mahdollisuutta parantaa turvallisuutta siirtämällä Loviisan ydinvoimalaitoksen hätädieselgeneraattoreiden pakollinen ennakkohuolto latausseinokista tehokäyttöön. Tässä ensimmäisessä luvussa määritellään tausta, laajuus ja arvioinnissa käytetyt menetelmät.

Toisessa luvussa kuvataan yleisesti Loviisan voimalaitos, turvallisuusperiaatteet ja erityisesti hätädieseljärjestelmät. Lisäksi siinä kuvataan laitoksen käyttötilojen määritelmät, alkutapahtumat ja kunnossapitokonsepti. Kuvaa täydentää lyhyt keskustelu sovellettavista laeista, säännöistä ja suosituksista.

Kolmannessa luvussa käsitellään yksityiskohtaisesti hätädieseljärjestelmien huoltosuunnitelmia ja saatavilla olevia tietoja aiemmin tehdyistä hätädieseljärjestelmän ennakkohuolloista. Lisäksi kuvataan kahden saksalaisen ydinvoimalaitoksen kunnossapitokäytäntöjä vertailun mahdollistamiseksi.

Neljäs luku on omistettu Loviisan voimalaitokselle tehdylle riskianalyysille (PRA) ja viides luku analyyseistä saaduille tuloksille.

Luvussa kuusi kartoitetaan suosituksia PRA-arvioinnin tulosten, kahden Saksan ydinvoimalaitoksen käytäntöjen ja kirjoittajan käyttökokemuksen perusteella.

Luvussa kuusi tiivistää opinnäytetyön ja antaa tulevaisuudennäkymän.

2 YLEISKUVA

Tämä luku antaa yleiskuvauksen Loviisan voimalaitoksesta, käytetystä terminologiasta, tämän opinnäytetyön kannalta oleellisista järjestelmistä ja prosesseista. Lisäksi siinä kuvataan Loviisan voimalaitoksen kunnossapidonkonsepti ja hätädieseleitä ja niiden ennakkohoitoja koskevat lait, määräykset ja säännökset.

Ydinreaktorien historian alusta lähtien tutkijat ja käyttäjät ovat olleet tietoisia turvallisuusjärjestelmien tarpeellisuudesta. Turvallisen sammutuksen varmistavat järjestelmät otettiin käyttöön Chicago Pile No. 1:ssä, joka oli ensimmäinen kriittiseksi tehty ydinreaktori

1942-12-02 15:25 (GMT-5) iltapäivällä. Reaktorissa oli käytössä pudottavien sulkusauvojen lisäksi kadmiumsuolaliuos, joka tarvittaessa manuaalisesti kaadettiin reaktorin päälle. (USDOE, 2005-2013)

Ensimmäisessä reaktorissa ei ollut säteilysuojauksia. (USDOE, 2005-2013) 1940- ja 1950-luvuilla Yhdysvalloissa suoritettiin useita tuhoavia reaktori- ja kriittisyystestejä, joiden reaktorin periodit $\tau < 10$ ms. Tällöin ymmärrettiin radioaktiivisen materiaalin leviämisen estämisen tärkeys. (SPERT I Reactor Safety Studies, 1958) (Tšernobylin onnettomuuden aikana reaktorin periodi oli $500 \text{ ms} < \tau < 600 \text{ ms}$, SPERT I kokeet olivat selkeästi destrukttiivinen sydämelle. (Kouts, 1986 s. 11)) Tehoreaktoreiden kehittyessä fissiotuotteiden jälkilämmön hallinnasta tuli yhä tärkeämpää.

Reaktorin jälkilämmön poistamiseen, kehitettiin ja asennettiin pääasiassa aktiivisia pumppujärjestelmiä. Aluksi järjestelmät olivat yleensä joko höyry- tai dieselkäyttöisiä pumppuja. Nykyään järjestelmät ovat pääasiassa sähkökäyttöisiä ja niiden sähkönsyöttö on varmistettu normaalin verkkosyötön lisäksi turbiinien omakäyttömahdollisuudella ja viime kädessä hätädieselgeneraattoreilla.

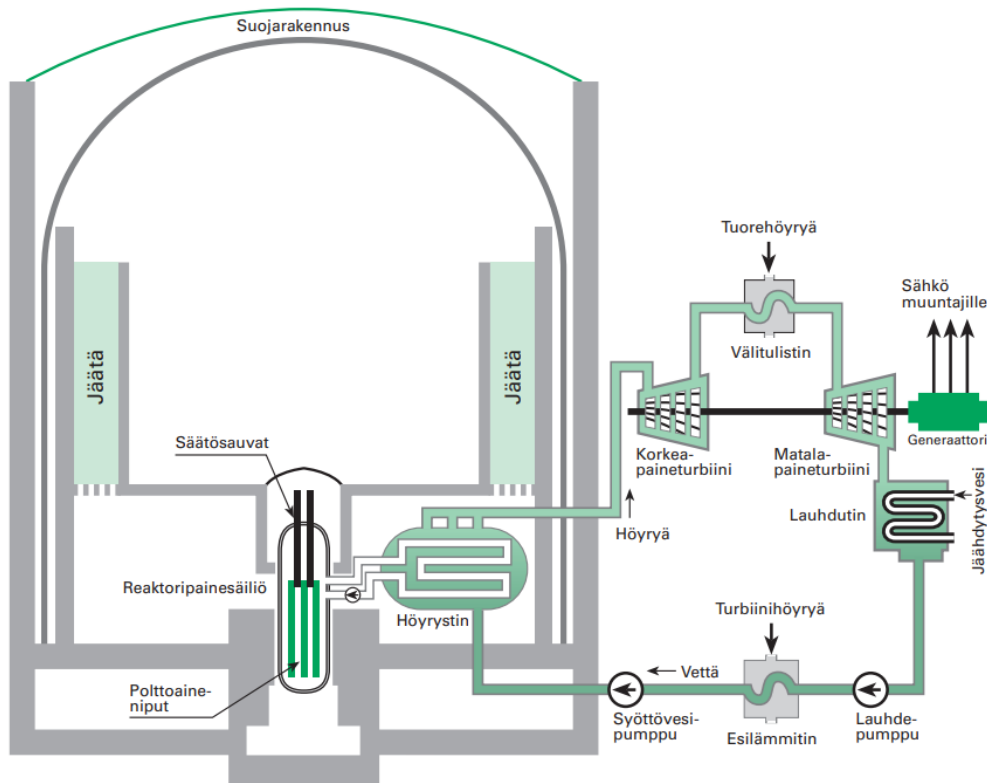
2.1 Laitoksen kuvaus

Loviisan ydinvoimalaitos koostuu kahdesta yksiköstä, joissa molemmissa on VVER-440/311 tyyppinen painevesireaktoria. Laitoksen reaktori- ja turbiinilaitos ovat suunniteltu ja valmistettu Neuvostoliitossa. Automaatiojärjestelmät toimitti pääasiassa Siemens ja ABB. Turvallisuusjärjestelmiä parannettiin merkittävästi Neuvostoliittolaisiin laitoksiin verrattuna. Näitä olivat mm. osajärjestelmien määrä, erottelu ja suojarakennuksen

rakentaminen. Ensimmäinen yksikkö (LO1) kytkettiin verkkoon 1977, toinen (LO2) 1980. Yhden yksikön terminen reaktoriteho on $P_{th,0} = 1\,500$ MW. Laitos sijaitsee Hästholmen saarella Loviisan kaupungin lähellä. (Leppäsalo, 2021 s. 5)



Kuva 1 Ydinvoimalaitos Loviisa (kuvaaja: Jens Hartmann, 2022)



Kuva 2 Loviisan ydinvoimalaitoksen periaatekaavio (Sandberg;ym., 2004 s. 45)

Painevesilaitos jakautuu kolmeen erillisiin piiriin: primääripiiri (reaktori ja höyrystimet), sekundääripiiri (höyrystimet, turbiinit ja lauhduttimet) ja merivesipiiri (lauhduttimet ja meri). Loviisan laitosyksiköllä on yksi reaktori, kuusi höyrystintä, kaksi turbiinia, generaattoria ja neljä lauhdutinta. (Leppäsalo, 2021)

Reaktorissa kuumentunut korkeapaineinen vesi johdetaan höyrystimien primääripuoleen, missä lämpö siirtyy höyrystimien sekundääripuoleen. Höyrystimissä jäähtynyt primäärivesi on pumpataan takaisin reaktoriin. Sekundääripuoleessa paine on alempi kuin primääripuoleessa, joten sekundäärin vesi höyrystyy. Höyry johdetaan turbiiniin, joka pyörittää generaattoria. Turbiinit koostuvat yhdestä korkea- ja kahdesta matalapaineosasta. Korkea- ja matalapaineturbiinien välissä on tuorehöyryllä lämmitetty välitulistin.

Turbiinin jälkeen höyry lauhtuu vedeksi lauhduttimessa. Lauhtunut vesi on pumpataan syöttövesisäiliöön ja esilämmittimien kautta takaisin höyrystimiin. Lauhduttimia jäähdyttää merivesi. Periaatekaavio on esitetty kuvassa 2. (Leppäsalo, 2021 s. 5)

Ydinenergian vapautuminen kevytvesireaktorissa on saavutetaan halkaisemalla ^{235}U hitailla neutroneilla. Uraanin halkeamisesta ja fissiotuotteiden hajoamisesta syntyneet neutronit hidastetaan vedessä, mikä on myös jäähdytysaine primääripiirissä.

2.2 Ydinfysiikka

Kun protonien määrä kasvaa ytimessä, positiivisten varausten aiheuttamat hylkivät voimat on kompensoitava, jotta ydin pysyy koossa. Neutronit tuottavat nämä voimat tilavuutensa kautta lisäämättä hylkiviä Coulombin voimia. Bethe-Weizsäcker-yhtälö (1) tarjoaa sille matemaattisen kuvauksen. (Ziegler, 1983 s. 25)

$$E_{\text{sitova}} = E_{\text{tilavuus}} - E_{\text{pinta}} - E_{\text{Coulomb}} - E_{\text{symmetria}} - E_{\text{paritus}}$$

$$E_{\text{sitova}} = a_t \cdot A - a_p \cdot A^{\frac{2}{3}} - a_c \cdot Z^2 \cdot A^{-\frac{1}{3}} - a_s \cdot \frac{(N - Z)^2}{A} + \epsilon a_p \cdot A^{-\frac{3}{4}} \quad (1)$$

E : energiat, $[E_x] = \text{MeV}$

ϵ : parifaktori, $[\epsilon] = 1$

a_x : faktorit, $[a_x] = \text{MeV}$

A : nukleonin määrä, $[A] = 1$

N : neutronin määrä, $[N] = 1$

Z : protonin määrä, $[Z] = 1$

Koska hylkivät (pääosin Coulombin ja pinta) voimat eivät kasva lineaarisesti, neutronien lukumäärän tulee nousta nopeammin kuin protonien lukumäärä ytimessä, jotta ne olisivat stabiileja tai ^{235}U :n tapauksessa kvasistabiileja. Koska uraanilla on suhteellisesti enemmän neutronia kuin esim. barium tai krypton fissiotuotteilla on kova neutroniylimäärä, kaikki ovat radioaktiivisia ja hajoavat neutroni-, β^- - ja γ -säteilyllä, Fissionituotteiden hajoaminen aiheuttaa myös reaktorinsulun jälkeen energiavapautuminen, noin 6–7 % reaktorin nimellisteholta ensimmäisessä sekunnissa reaktorinsulun jälkeen. Ns. 'jätkälämpö' laskea $t^{-0,2}$ -hajoavat. (Ziegler, 1983 s. 52)

$$\frac{P}{P_0} = 6,22 \cdot 10^{-2} \cdot [t^{-0,2} - (T_0 + t)^{-0,2}] \quad (2)$$

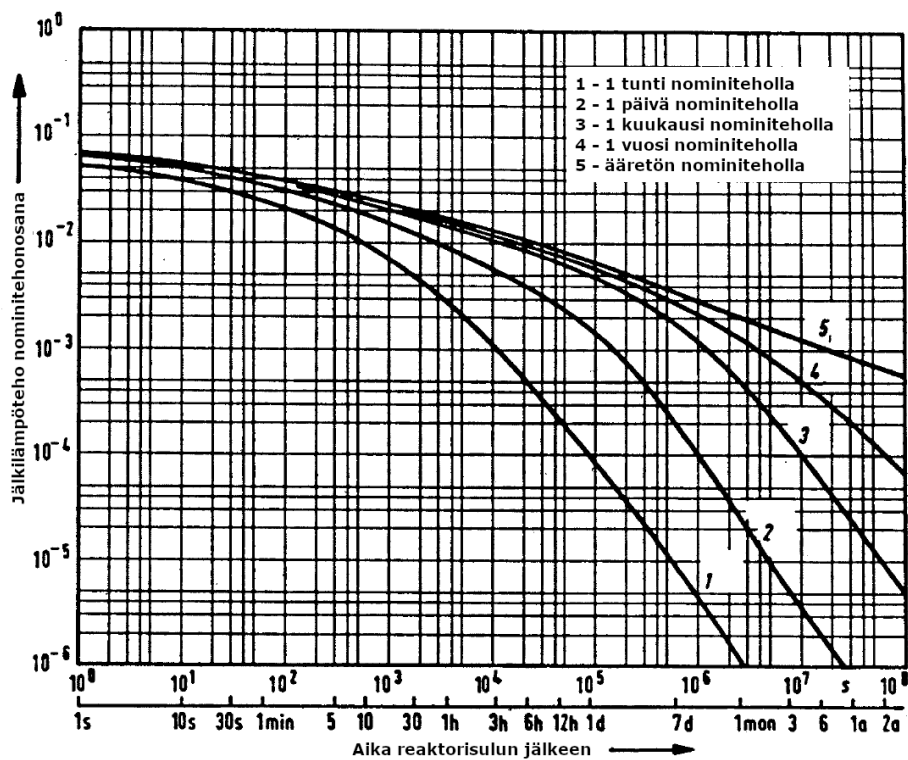
$10^1 < t < 10^7$ mukaan

P : jälkilämpöteho, $[P] = W$

P_0 : reaktorin nimellisteho, $[P_0] = W$

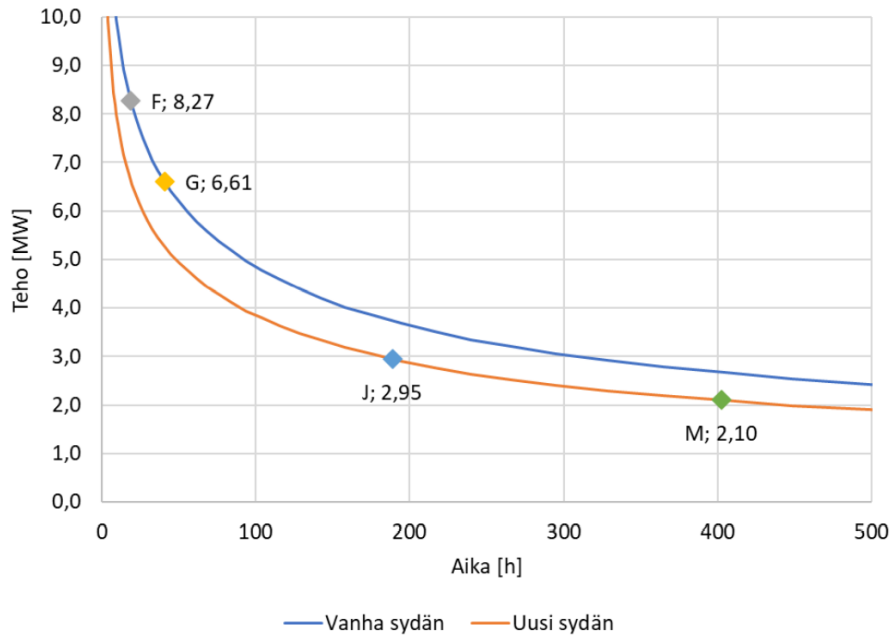
t : aika reaktorisulun jälkeen, $[t] = s$

T_0 : käyttöaika nimellisteholla, $[T_0] = s$



Kuva 3 Jälkilämpö ajan funktiona (kieli sovitettu) (Lederer;ym., 1992 s. 23)

Reaktorin jälkilämpö laskee noin n. 1 %:lle 3 h sulun jälkeen, kuva 3. Paitsi jälkilämpö myös primääripiirin sitoutunut lämpö pitää poistaa reaktorista ja siirtää mereen tai ilmakehään reaktorisulun jälkeen.



Kuva 4 SaTu-järjestelmän jälkilämpötehokäyrä (Laato, 2021 s. 9)

Kuva 4 näyttää pitkän aikavälin lähdetermin, jota käytetään PRA-mallissa. Suora vertailu kuvan 3 kanssa vaatii toisen ajatuksen johtuen eri akselin jako (lineaarinen vastaan logaritminen) ja myös teho (suhteellinen vastaan absoluuttinen), mutta kun $P_{th} = 1\,500$ MW otetaan huomioon, kuvat eivät ole ristiriitaisia.

2.3 Turvallisuusperiaatteet

Turvallisuustavoitteet

Ydinvoimalaitoksien turvallisuuden vaikuttavat toiminnot jaetaan yleensä kolmeen pääturvallisuustoimintoon:

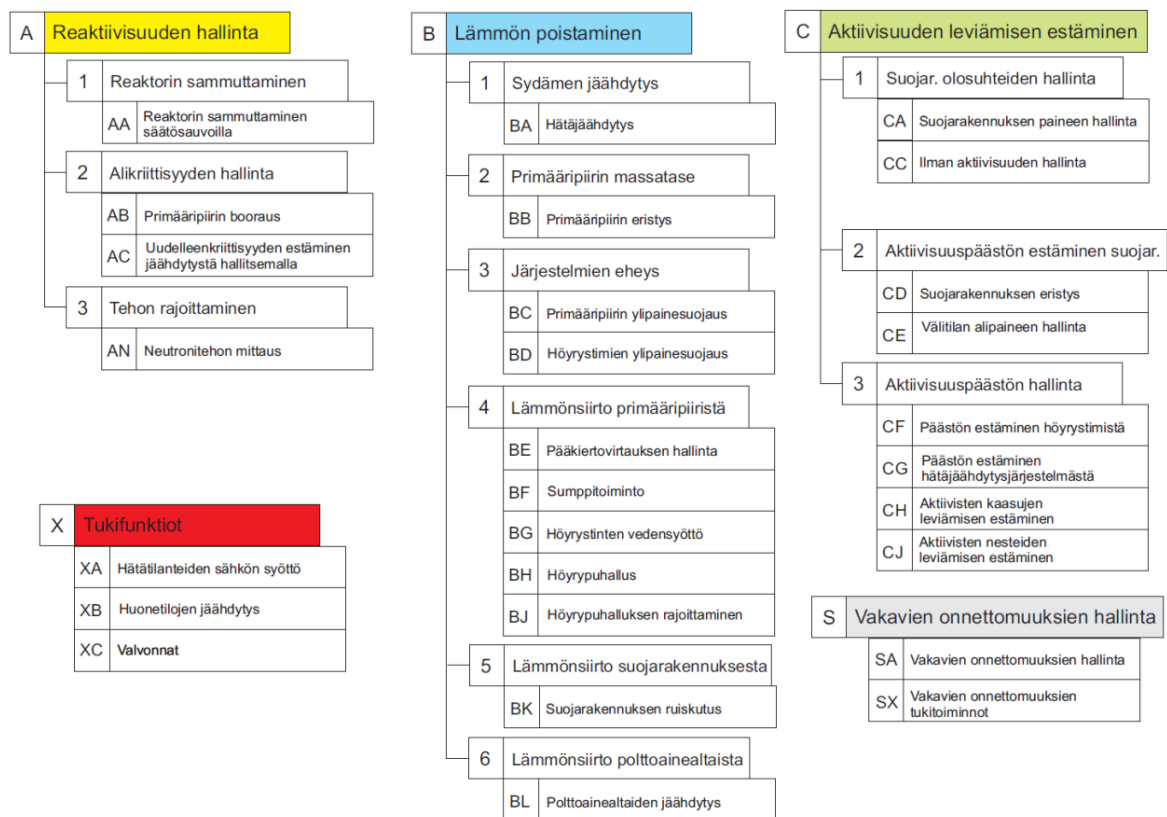
- reaktiivisuuden hallinta (A)
- lämmön poistaminen (B)
- aktiivisuuden leviämisen estäminen (C)

Näiden lisäksi käytetään usein seuraavia toimintoja:

- tukifunktiot (X)
- vakavien onnettomuuksien hallinta (S)

Järjestelmät, jotka toteuttavat näitä turvallisuustoimintoja kutsutaan turvallisuusjärjestelmiksi. Turvallisuusjärjestelmä voisi olla passiivinen (esim. suojausrakennus) mutta yleensä se on aktiivinen eli energiaa sen käyttämiseen tarvitaan. (Leppäsalo, 2021 s. 11)

Kuva 5 esittelee suhteet turvallisuustavoitteiden (yksi kirjain), turvallisuustehtävien (numero) ja turvallisuustoimintojen (kaksi kirjainta) välillä. Tämä diplomityö kohdistuu turvallisuustehtävään 'XA – Häätätilanteiden sähkön syöttö'.



Kuva 5 Turvallisuustehtävät ja turvallisuustoimintojen nimeäminen (Ahokas, 2021 s. 6)

Redundanssi-periaate

Redundanssilla, eli monikertaisuudella tarkoitetaan, että käytettävissä on järjestelmiä, laitteita tai rakenteita samalla toiminnolla enemmän kuin tarvitaan. (KTA, 2017 s. 3)

Redundanssien pitää olla riippumattomia toisistaan, häiriö yhdessä redundanssissa ei saa johtaa häiriöön toisessa redundanssissa. (KTA, 2017 s. 14)

Vikakriteerivaatimukset ovat (N+2, tai enemmän), (N+1) ja (N+0). N kertoo toiminnon tarvitaan vähimmäismäärä. (N+0):lla on mahdollista toteuttaa turvallisuustoimintaa, (N+1):lla voi toteuttaa turvallisuustoiminto yksittäisvian tapauksessa. (N+2):lla voi toteuttaa turvallisuustoiminnon myös yksittäisvian ja samanaikaisen ennakkohuollon aikana. (Ahokas;ym., 2020 s. 5)

Loviisan ydinvoimalaitoksen prosessi- ja ilmastointijärjestelmän passiivisten komponentit (putkisto, lämmönvaihtimet, säiliöt) ovat suunniteltu periaatteessa kahteen redundanssiin (2 x 100 %, N+1). Turvallisuusjärjestelmien aktiivisten komponentit (pumput, dieselgeneraattorit, sähkösyöttö, jne.) ovat suunnitelleet neljään redundanssiin (4 x 100 %, N+3). (Ahokas;ym., 2020 s. 9)

Erilaisuus-periaate

Erilaisuus vaatii että sama turvallisuustoiminto on tehnyt erilaisella periaatteella (diversiteetti). Idea on että erilaisuus estää turvallisuustoimintojen vikaantumisen samasta syystä (yhteisvika). Erilaisuusperiaatteen toteuttaminen on erittäin vaativaa, koska usein eri toimittajat käyttävät samoja peruskomponentteja laitteissaan tai järjestelmissä. (Ahokas;ym., 2020 s. 4)

Erottelu-periaate

Turvallisuustoimintoja toteuttavat järjestelmät tulee olla eroteltu siten että yksittäinen vika tai tapahtuma (esim. tulipalo, tulva jne.) ei vahingoita muita redundansseja. (Ahokas;ym., 2020 s. 5)

Turvallisuusluokitus

Ydinvoimalaitokset koostuvat monista erilaisista järjestelmistä. Juomavesijärjestelmästä ydinpolttoainetta jäähdyttävään primääripiiriin jokaisella järjestelmällä on oma tehtävänsä suoritettavana. Järjestelmät luokitellaan turvallisuusmerkityksen perusteella eri luokkiin ja niiden perusteella määritellään vaatimuksia laitteiden suunnittelun, valmistuksen, luotettavuuden, käytön ja huollon laadunhallinnalle.

Eri turvallisuusluokat vaativat erilaisia huoltostrategioita ja niille sallitaan eripituisia häiriöaikoja. Esimerkiksi: sosiaalisten rakennusten juomaveden järjestelmiä voidaan ylläpitää "run-to-failure" -periaatteella, ja ne voivat olla poissa muutaman päivän ajan

vaarantamatta mitään sydämen eheyden turvallisuustoimintoja. Häädieselgeneraattorijärjestelmät ovat turvallisuuden kannalta kriittisiä, eivätkä ne saa olla pois käytöstä pitkiä aikoja. Niiden huoltotyöt on suunniteltava siten että niiden luotettavuus on mahdollisimman korkea eikä huoltoaika vaaranna laitoksen turvallisuutta .

Säteilyturvakeskuksen määräyksen ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta (STUK Y/1/2018) 4 §:n mukaan:

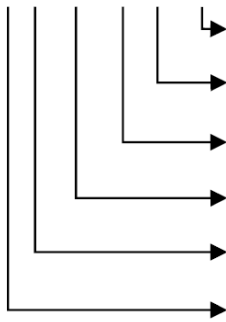
- 1. Ydinlaitoksen turvallisuustoiminnot on määriteltävä ja niitä toteuttavat sekä niihin liittyvät järjestelmät, rakenteet ja laitteet on luokiteltava niiden turvallisuusmerkityksen perusteella.*
- 2. Turvallisuustoimintoja toteuttaville sekä niihin liittyville järjestelmille, rakenteille ja laitteille asetettujen vaatimusten ja niiden vaatimustenmukaisuuden varmistamiseksi tehtävien toimenpiteiden on oltava kohteen turvallisuusluokan mukaisia. [2019-06-15]*

Turvajärjestelmien komponenttien luokitus perustuu STUK:n YVL B.2-ohjeeseen (STUK, 2019). YVL B.2 määrittelee kolme turvallisuusluokkaa (S1, S2 ja S3) ja 'ei ydinteknisesti turvallisuusluokiteltu' (EYT). Turvallisuusluokkien S3:n ja EYT:n välillä on 'STUK-kiinnostava luokka' (EYT/STUK). Riippuen turvatoimintojen turvallisuuden tärkeydestä varmistaa sydänehäydeturvajärjestelmät lajitellaan sääntöjen mukaan turvallisuusluokkiin.

2.4 KZ-Järjestelmä

KZ-järjestelmä on Saksassa kehitetty ydinvoimaloiden koodaus- ja merkintäjärjestelmä. Järjestelmät on ryhmitelty laitossyksikön, redundanssin, toiminnallisuuden, järjestelmän sisäisen alaryhmän ja yksittäisten komponenttien ominaisuuksien mukaan. Järjestelmä mahdollistaa myös prosessiautomaattiosignaalien systemaattisen merkitsemisen edistyneemmällä tasolla. Tärkeää on huomata, että KZ-järjestelmä on koodausjärjestelmä, joten se ei perustu lyhenteisiin, kuten se on yleinen Ranskassa tai Yhdysvalloissa. (Kelavirta, 2021)

1|0|RA|11|S|0001



Lohko 6, juokseva nro ja signaalinmuodostus

Lohko 5, laitekoodi

Lohko 4, prosessiosan tunnus

Lohko 3, järjestelmätunnus

Lohko 2, redundanssitunnus

Lohko 1, laitostunnus

Kuva 6 KZ-tunnus esimerkki ja sen rakenne (Kelavirta, 2021 s. 1 (Liite 3))

Täydellinen KZ-vihko löytyy liitteessä 2.

2.5 Sähköjärjestelmät

Loviisan voimalaitoksen sähköjärjestelmillä on periaatteessa kolme päätehtävää jotka ovat:

1. Syöttää tuotettu sähköenergia generaattorista suomen kantaverkkoon
2. Syöttää sähköä toimilaitteille ja automaatiokaapeille normaalissa käyttötilanteissa
3. Syöttää sähköä turvallisuustoimilaitteille ja -automaatiokaapeille hätätilanteessa

Laitoksen tärkeimmät sähköyhteydet ja lähteet, jotka on suunniteltu tehokäytölle, vuosihuollon ajaksi ja hätätilanteille (Piensalo, 2022):

1. Kaksi 400 kV yhteistä kantaverkkoon (Anttilalle/-lta ja Korialle/-lta)
2. Yksi 110 kV yhteys kantaverkkoon (Hagalundille/-lta)
3. Yksi 20 kV suorayhteys vesilaitokselta (Ahvenkoski)

$$S_{max} = 4,7 \text{ MVA (Piensalo, 2021 s. 17)}$$
4. Kaksi oma generaattoria (SP10 ja SP50) per laitosyksikö

$$2 \times P_{max} = 268 \text{ MW}$$
5. Neljä hätädieselgeneraattoria (EY01, EY02, EY03 ja EY04) per laitosyksikö

$$4 \times P_{max} = 2,8 \text{ MW}$$
6. Yksi vakavien onnettomuuksien hallinta hätädieselgeneraattori (EY5) per laitosyksikö

$$P_{max} = 550 \text{ kW}$$
7. Yksi dieselgeneraattori (10EY07) varavoimalaitoksella

$$P_{max} = 9,7 \text{ MW}$$

Sähköjärjestelmien kaavio löytyy liitteessä 1. Sähköjärjestelmät ovat jaettu kahteen redundanssiin. Molemmissa redundansseissa on kaksi dieselvarmennettu kiskoa, joista syötetään turvallisuusjärjestelmiä.

2.5.1 Sähköjärjestelmien arkkitehtuuri

Dieseljärjestelmät ovat osa Loviisan voimalaitoksen turvajärjestelmien sähkönsyötön 'defence-in-depth' eli syväpuolustuskonseptia. Syväpuolustuskonseptin ideana on useita puolustuslinjoja tietyn toiminnon toteuttamiseksi. Sähkönsyötön osalta ensimmäinen puolustuslinja kattaa 400 kV:n kantaverkoyhteyden ja käynnissä höyryturbiinigeneraattorit. Seuraava puolustuslinja on 110 kV liitäntä. Kolmas ja viimeinen puolustuslinja on hätädieseljärjestelmät.

1. Ensimmäinen puolustuslinja on kaksi 400 kV:n liitäntää. Tämä yhteys on tarkoitettu pääasiassa tuotetun sähkön syöttämiseen kantaverkkoon. Mikäli yhteys 400 kV:n kantaverkkoon menetetään, voidaan siirtyä omakäytölle jolla turvataan laitoksen sähkön saanti. Omakäytöllä toiminen on rajoitettu TTKE:ssä yhteen vuorokauteen vaikka toiminta olisi teknisesti mahdollista pidempään (tällöin hyötysuhde ja muut laitoksen parametrit eivät ole optimaalisia). Omakäytöllä riski sähkösyötön menetykseen kasvaa ja siksi on turvallisempaa ajaa laitos kokonaan alas. (Ronkainen, 2021 s. 3.3.17/4)
2. Toinen puolustuslinja on 110 kV:n yhteys kantaverkkoon. Tämä yhteys on tarkoitettu varmistukseksi seisokkien aikana, mikäli 400 kV:n yhteys ei ole käytettävissä huollon vuoksi. Kapasiteetti on suunniteltu omaan kulutukseen seisokkien aikana. 110 kV:n muuntaja pystyy syöttämään laitoksen tarvitseman sähkön seisokkitilanteissa ja hätätilanteissa. Vaikka muuntaja pystyy kattamaan talon kuorman katkosten ja hätätilanteiden varalta, suurten kuluttajien käynnistäminen on rajallista ja muuntaja ei ole tarpeeksi suuri tuottamaan tehokäytön edellyttämää tehoa. (Piensalo, 2022 s. 5)

3. Kolmas puolustuslinja ovat neljä hätädieseljärjestelmää. Nämä järjestelmät toimittavat sähkön laitoksen turvajärjestelmille. Yhteisvika dieseljärjestelmissä nostaa merkittävästi sydämen vaurioitumisriskiä. Ensimmäiset puolustuslinjat (400 kV ja 110 kV) takaavat riittävän sähkön syötön sydämen jäähtymisen ja automaatiojärjestelmiin mutta ulkoisen verkon menetystilanteessa ne eivät ole käytettävissä
4. Neljäs puolustuslinja voitaisiin johtaa Saksan ydinvoimaloista seuraavasti:
Fukushiman onnettomuus osoitti sähkön saatavuuden tärkeyden. Tämän seurauksena saksalaiset ydinvoimalaitokset päivittivät suunnittelun asentamalla vakiosyöttöpisteitä liikkuville generaattoreille 0,4 kV:n jännitteelle ja siirrettävät pumput (periaatteessa tavalliset bensiinikäyttöiset liikkuvat sammutuspumput) veden syöttämiseksi höyrygeneraattoreihin, suojarakennuksenkaivoon¹ tai ja akkujen lataamiseen. (RSK, 2011 s. 12)

2.5.2 Dieselvarmennetut sähköjärjestelmät

Jokainen kahdeksasta hätädieselgeneraattorista sijaitsee erillisissä huoneissa dieselrakennuksessa, mikä täyttää erotteluvaatimuksen. Lisäksi dieselgeneraattoreilla on omat riippumattomat apujärjestelmät, mikä täyttää järjestelmäerotteluvaatimuksen. (Piensalo, 2021)

Suuremmille apukomponenteille 400 V vaihtosähkökisko (EU, EV, EW ja EX) syötetään dieselkiskosta muuntajan kautta. Dieselin käynnistämiseen tarvittavien automaatiojärjestelmien sähkönsyöttö saadaan akkuvarmennetusta tasasähkökiskosta (FK, FL, FM ja FN). Sähkösyötön periaatekaavio löytyy kuvassa 7. (Piensalo, 2021)

Jokainen dieselgeneraattori syöttää omaa erillistä ns. dieselkiskoa, josta syötetään myös normaalikäytön kiskoa (BA, BB, BC ja BD). Jos dieselkisko menettää jännitteen (testi, toimintakisko sähkökatkos tai dieselin ja käyttökiskon irtoaminen), dieselgeneraattori alkaa syöttää dieselkiskoa ja sen alla olevia kiskoja automaattisesti (Piensalo, 2021) Koeajoja

¹ Reaktorirakennuksen syvin kohta, josta jäähtyysvesi voidaan pumpata korkea- ja matalapaineruiskutusjärjestelmillä takaisin primääripiiriin.

varten dieselgeneraattori on synkronoidaan jännitteeseen dieselkiskoon ja teho syötetään verkkoon.

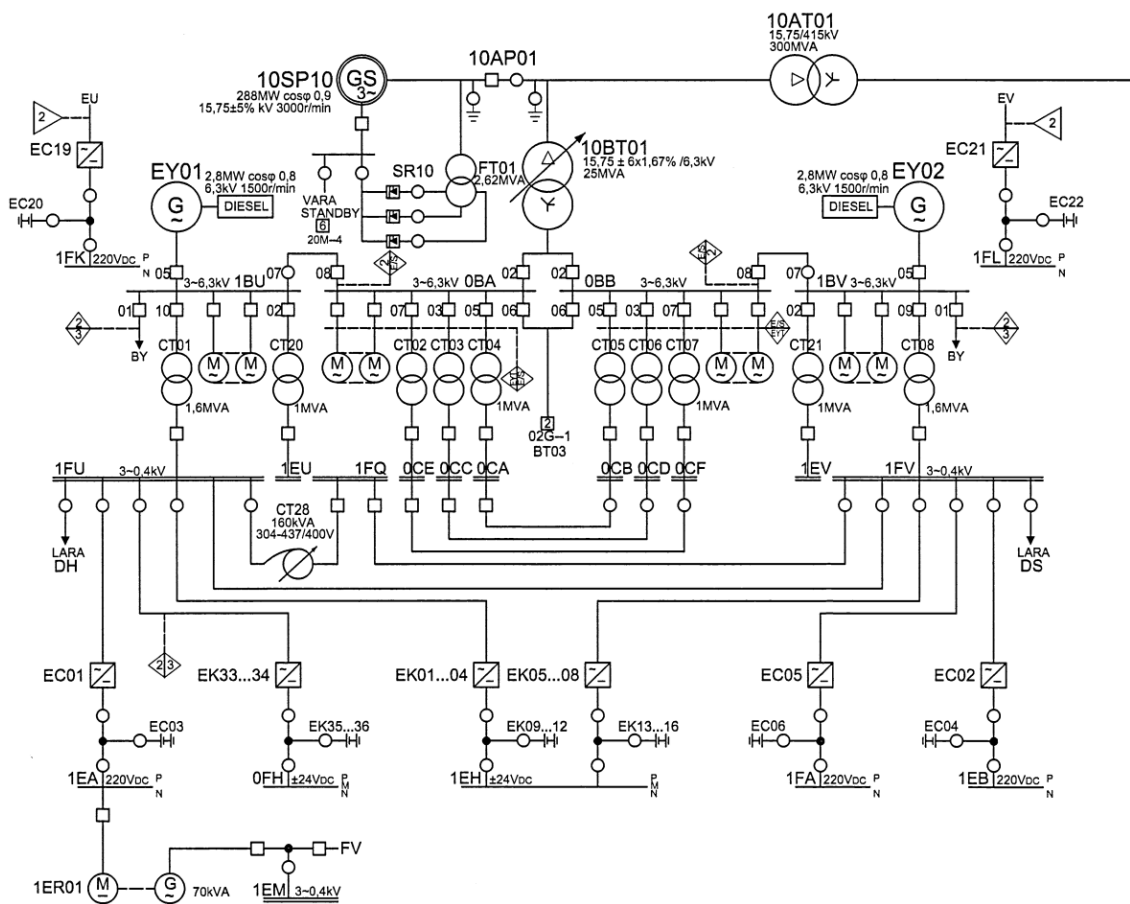
Tällä hetkellä kaksi LO1:n dieselgeneraattoria on varustettu uudella, digitaalisella automaatiojärjestelmällä. Tällä ei ole merkittävää vaikutusta dieselien huoltojen keston. (Rosenström, 2021)

Dieselkiskot ovat äärimmäisen tärkeitä turvajärjestelmien sähkön syötölle. Mikäli dieselkisko on epäkäytettävä, on myös sen alla olevat turvallisuusjärjestelmät epäkäytettäviä, vaikka sähköä olisi saatavilla valtakunnan verkosta, Ahvenkoskelta tai hätadieseileiltä. Yhteisvika dieseljärjestelmissä nostaa merkittävästi sydämen vaurioitumisriskiä.

Taulukko 1 Dieselgeneraattorin tärkeimmät tiedot (Piensalo, 2021 s. 53)

Moottori	Tyyppi	Ahdettu, nelitahtinen, V-rakenteinen AGO V 16 ESHR
	Valmistaja	Wärtsilä Diesel
	Nimellisteho	2 940 kW
	Nimellisnopeus	1 500 min ⁻¹
	Jäädytysaine	vesi
	Sylinterin lukumäärä	16
	Iskutilavuus	163,5 dm ³
	Polttoaineen kulutus	0,060 kg MJ ⁻¹
	Paino	20 Mg
	Starttitapa	paineilma (30 bar)
Generaattori	Tyyppi	Harjattomalla magnetointilaitteistolla varustettu avonapatahtigeneraattori HSPTL 12 / 852 B3
	Valmistaja	Oy Strömberg Ab
	Nimellisteho (S_N , P_N)	3 500 kVA, 2 800 kW

Nimellisaajuus	1 500 min ⁻¹
Nimellisteho	50 Hz
Nimellispäänteen	6,3 kV
Jäähdytysaine	ilma
Paino	12 400 kg



Kuva 7 Sähköjärjestelmä LO1 redundanssi 1 (Fortum, 2014 s. G01xP10)

2.5.3 Ahvenkosken voimalaitos

Ahvenkosken vesivoimalaitoksella (AHV) on kaksi Kaplan-turbiinilla varustettua generaattoria. AHV on sijaitse noin 15 km päässä Loviisan voimalaitoksesta. Yhteys voimalaitokselle on 20 kV-ilmalinjalla. Generaattorin teho on 16 MVA per turbiini. Generaattori 1 voi kytkeytyä Loviisan voimalaitoksen BY-kiskoa (Liite 1, J23-26), mistä

sähkö voidaan edelleen syöttää valittuun dieselkiskoon. Maksimiteho minkä AHV voi syöttää Loviisan voimalaitokselle on $P_{max} = 4,7$ MVA ja suurin yksittäinen moottorinteho on $P_{max} = 630$ kW, mikä on riittävä teho hätätilanteessa molemmille yksiköille samanaikaisesti turvajärjestelmien yhteen neljännekseen. AHV voi korvata yhden redundanssin dieselgeneraattorin per yksikkö. (Piensalo, 2021 ss. 17-23)

2.6 Laitoksen vakiotilat

Laitoksen käyttötilat on jaettu kuuteen osaan pääasiassa prosessiparametrien, kuten primääriveden lämpötilan, paineen, primääriveden boorihappopitoisuuden ja neutronivuosta johdetun tehon mukaan. Nämä käyttötilat antavat perusvaatimukset laitoksen käytölle.

Taulukko 2 Loviisan laitoksen vakiotilat (Sirén;ym., 2021 ss. 7-8)

Vakiotila a	Käyttötila		Vakiotila a	Käyttötila		Vakiotila a	Käyttötila	
P	Tehokäyttö	Alasajon kuumat tilat	F	Kylmaseisoki	Kylmät tilat	M	Kuumaseisoki	Ylösajon kuumat tilat
A								
B	Käynnistystila		G			N	Kuumavalmius	
C	Kuumavalmius		H-J	Latausseisoki		O	Käynnistystila	
D	Kuumaseisoki		K	Kylmaseisoki		Q	Tehokäyttö	
E			L					

Turvallisuustekniset käyttöehdot määrittelevät näille kuudelle käyttötilalle järjestelmien käytettävyyksvaatimukset, korjausaikojen enimmäisajat ja vaadittavat toimet mikäli niitä ei täytetä. (Ronkainen, 2021 s. 1/7)

Kuusi pääkäyttötilaa on jaettu tarkempiin osiin (A - Q), joita käytetään pääasiassa PRA:ssa. Näiden käyttötilojen yhteydet on esitetty taulukossa 2.

PRA-mallissa käytetään tarkempia vakiotiloja TTKE:hen nähden. Tarkemmissa vakiotiloissa on käytetty määrittävänä tekijänä polttoaineriippujen määrä paineastiassa, paineistimen tai latauspinnan tasoa (jäähdytykseen käytettävän veden määrä). Tarkempien käyttötilojen tavoitteena on saada yksityiskohtainen PRA-malli riskien arvioimiseksi tarkemmin. (Sirén;ym., 2021 ss. 7-8)

Revisio

Valitun tekniikan vuoksi reaktori pitää avata kerran vuodessa polttoaineen vaihtoa varten. ja. Tällöin laitos sammutaan, jäähdytetään ja paine lasketaan. Ajanjakson nimi on 'seisokki' tai 'revisio'. Seisokin aikana tehdään polttoainelatauksen lisäksi kaikki laitoksen sammuttamista vaativat työt. Tämä sisältää ennaltaehkäisevän ja korjaavan huollon, uusien komponenttien ja järjestelmien käyttöönoton sekä tietyt määräaikaistestit. Töiden laajuudesta riippuen seisokkien kesto vaihtelee, mutta keskimäärin se on noin 10 % ajasta eli 876 tuntia vuodessa. (Sirén;ym., 2021 s. 7)

2.7 Kunnossapitokonsepti

Oleellinen osa voimalaitoksen turvallisuuden varmistamista on kaikkien laitteiden pitäminen hyvässä kunnossa. Tämä edellyttää, että laitteiden käytöstä johtuva kuluminen ja myös niiden ikääntyminen on hallittava kunnossapidolla. Loviisan voimalaitoksen kunnossapitokonseptin päätavoitteet ovat seuraavat: (Riekkinen, 2021 s. 5)

- Parantaa turvallisuutta (laitos/ympäristö/henkilö)
- Optimoida laitteistojen, laitteiden ja komponenttien käytettävyyttä
- Tehostaa kunnossapidon suorituskykyä
- Vähentää uudelleenkorjauksia
- Parantaa laitteiston kunnossapidettävyyttä
- Kasvattaa organisaation suorituskykyä
- Optimoida kunnossapitokustannuksia
- Turvata laitoksen taloudellisen käyttöikä

Näiden kaikkien saavuttamiseksi tarvitaan kunnossapitotehtävien perusteellinen suunnittelu. Töiden priorisointi myös taloudellisia näkökohtia silmällä pitäen johtaa kunnossapidon parantamiseen. Priorisointi on toteutettu Loviisan voimalaitoksella jakamalla kunnossapitotyöt neljään ryhmään (Riekkinen, 2021 s. 6):

- Ennakoiva – kuntoon perustava
- Yhdistelmä – ennakoiva / ehkäisevä
- Ehkäisevä – Aikaan perustava
- Korjaava – 'run-to-failure'

Yksittäisen komponentin ja järjestelmien lajittelemiseksi kunnossapitoryhmiin käytetään luokittelujärjestelmää, jolla arvioidaan laitteen merkitys laitoksen turvallisuudelle, eli vian vaikutusta vakavaan ydinvaurioon, mutta huomioidaan myös sen merkitys laitoksen käytön ja luotettavuuden kannalta. Ryhmä valitaan käsittelemällä kukin komponentti päätöspuun läpi (löytyy liitteessä 3). Valittu ryhmä dokumentoidaan laitoksen toiminnan ohjausjärjestelmään LOMAX.

2.8 Onnettomuuksien alkutapahtumat

Onnettomuudet voidaan ryhmitellä ulkoisiin ja sisäisiin onnettomuuksiin. Esimerkkejä ulkoisista tapahtumista ovat mm. tulva, kovat sääilmiöt, seismiset tapahtumat. Sisäisiä tapahtumia ovat mm. sisäiset tulvat, pääputkien rikkoutuminen (LOCA), höyrygeneraattorin putken repeämät (SGTR) ja monet muut.

Näiden kaikkien onnettomuuksien hoitamiseen tarvitaan sähköä, jotta laitos pysyy suunnittelun rajoissa ja estetään sydämen sulaminen. Hätädieseljärjestelmän vika voi johtaa järjestelmän epäkäytettävyyteen ja sydänvauriotaajuuden kasvuun.

2.9 Hätädieselleitä koskevat lait, säännökset ja suositukset

Loviisan voimalaitos on erityisen ainutlaatuinen johtuen eri puolilta maailmaa olevien teknologioiden yhdistelmästä. Vielä 1970-luvulla suurin osa komponenteista valmistettiin joko entisen Neuvostoliiton alueella tai Suomessa, automaatiojärjestelmät olivat Länsi-

Saksasta ja suojarakennus on muunnelma yhdysvaltalaisen Westinghouse:n jääsuojarakennukselta. (Lobner;ym., 1990 s. 3/7), (Lamroth, 2006)

Tämä ainutlaatuisuus johtaa laajaan valikoimaan käytettyjä lakeja, suunnittelusääntöjä ja normeja kaikista mukana olevista maista. Myös Suomen jäsenyys ydin-, insinööri- ja talousorganisaatioissa (IAEA, EU, IEC, OECD jne.) sisältää sitoutumisen kansainvälisten standardien soveltamiseen ja kansallisten lakien, sääntöjen ja normien mukauttamiseen niiden mukaisesti.

IAEA:n ydinturvallisuuskonventio ja EU:n -direktiivit ovat sitovia ja ovat huomioitava kansallisessa lainsäädännössä. Kansainväliset standardiorganisaatiot antavat suosituksia, joita sovelletaan vapaaehtoisesti. Organisaatiot, kuten esimerkiksi OECD, eivät tarjoa normatiivisia asiakirjoja, vaan tarjoavat yhteisen alustan asiantuntijoiden yhteistyölle.

Jotta voimalaitoksen henkilökunta voisi helposti löytää, ymmärtää ja hyödyntää kaikkia tiettyyn tehtävään sovellettavia sääntöjä Loviisan voimalaitoksella, kansalliset ja kansainväliset säännöt ja suositukset muotoillaan asiakirjoiksi ja sisäisiksi säännöiksi, jotka täyttävät ja usein ylittävät kaikki annetut vaatimukset.

Eri tasojen lainsäädännön (laki, säännöt, normit jne.) lisäksi kansainvälinen ydinvoimayhteisö (esim. IAEA, WANO, INPO jne.) julkaisee ohjeita ja suosituksia parhaista käytännöistä . Myös niitä sovelletaan ja huomioidaan kirjoitettaessa sisäisiä sääntöjä.

Kansainvälinen säännöstö

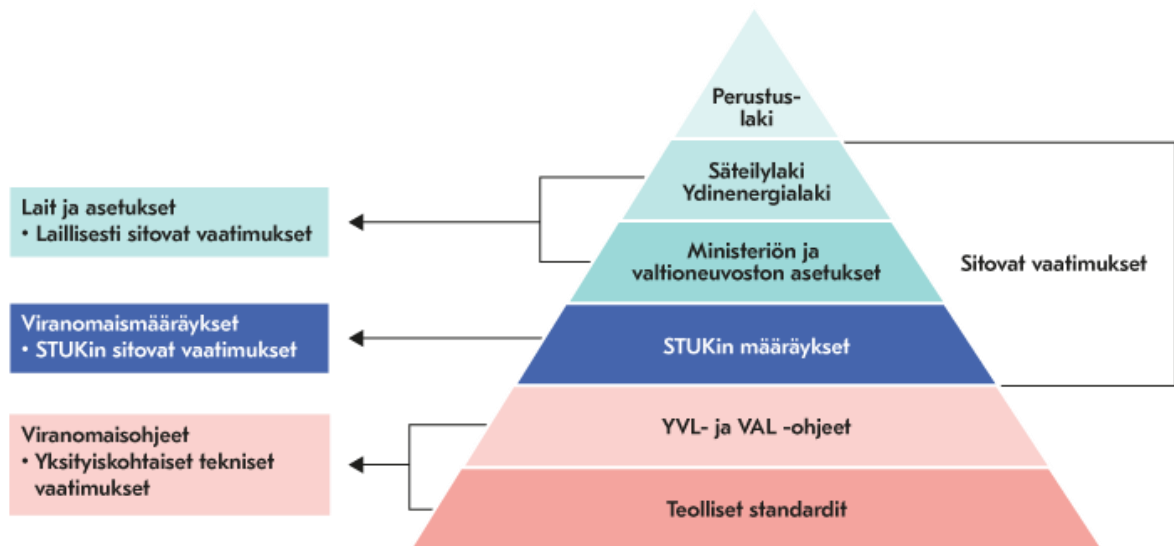
Suunnittelussa ja käytössä otettiin huomioon useita kansainvälisiä suunnittelukriteereitä, määräyksiä ja sääntöjä. Loviisan voimalaitoksella tärkeimmät mitoitusta määrittävät ovat US NRC:n julkaisemat 'General Design Criteria for Nuclear Power Plants' ja saksalainen KTA 3702 'Emergency Power Generating Facilities with Diesel-Generator Units in Nuclear Power Plants'. Nämä asiakirjat määrittävät sähköjärjestelmän suunnittelukriteerit, varavoimajärjestelmän tehon, käyttövyysvaatimukset ja vikakriteerit.

Kansallinen säännöstö

Suomessa Ydinenergialaki (990/1987) säätelee fissioenergian rauhanomaista käyttöä ihmisille ja ympäristölle turvallisella tavalla ja ydinaseiden leviämisen välttämiseksi. Tarkemmat vaatimukset on esitetty Säteilyturvallisuuskeskuksen (STUK)

ydinturvallisuusohjeissa (YVL-ohjeet). Häädieseljärjestelmiä koskevat tärkeimmät YVL-ohjeet ovat:

- YVL B.2: Turvallisuusjärjestelmien luokitus
- YVL B.1: Yleinen 72 tunnin omavaraisuuden tarve (sisältäen energiansaannin, spesifisesti YVL B.1, [5426 - 5435]).
- YVL A.8: Kunnossapidon puitteet
- YVL A.7, YVL B.3: vaatimukset riskianalyysistä (todennäköisyyspohjainen ja deterministinen).



Kuva 8 Suomalainen säännöstö (Kuva: stuk.fi/saanosto)

Sisäinen säännöstö

Loviisan voimalaitoksen sisäiset asiakirjat määrittelevät häädieselgeneraattoreiden huolto- ja testausohjelman, jota käsitellään tarkemmin luvussa 3. Tärkein asiakirja on turvallisuustekniset käyttöehdot (TKKE). TKKE määrittää suurimmat sallitut epäkäytettävyydet (suunnitellut ja vioista johtuvat). Epäkäytettävyyksien sallitut enimmäiskestot erityisesti tehokäytön aikana (vaiheet P, Q ja A; eli 'tehokäyttö') perustuu YVL A.6:een [738]:

Erilaisten käyttörajoitusaikojen määrä on pieni.

TTKE:n vaatimukset on laadittu ennen laitoksen käyttöönottoa eikä silloin ollut käytössä riskipohjaista todennäköisyysanalyysiä, jolla olisi voinut arvioida laitteiden epäkäytettävyyden vaikutusta sydänvauriotaajuuteen. Päätökset vaatimuksista tehtiin perustuen kansainväliseen kokemukseen, konservatiiviseen turvallisuusajatteluun ja realistisina pidettyihin korjausmahdollisuuksiin.

3 HÄTÄDIESELEIDEN ENNAKKOHUOLTO

Tämä luku antaa yleiskatsauksen Loviisan voimalaitoksen hätädieselgeneraattoreiden ennakkohuolloista ja niiden menettelyistä. Lisäksi tässä luvussa käsitellään käytettävissä olevien LOMAX-tietojen arvioinnin tuloksia. Ennakkohuoltojen vertailukohdaksi on otettu kahden ydinvoimalan käytännöt Saksassa. Vaikka näiden laitoksien sähkötehot ovat lähes kolminkertaiset ja redundanssijärjestelmät hieman erilaiset, vertailukelpoisuus on hyvä.

Tässä työssä käsitellään vain ennakkohuoltotöiden ajankohtien muutosta, ei huolto-ohjelmien sisältöä. Tämän johdosta työssä ei esitellä yksittäisiä töitä tarkemmin. Yksityiskohtaiset tiedot Loviisan dieselgeneraattorin, -moottorin ja -kiskon huolto-ohjelmista löytyvät vastaavista asiakirjoista. (Malmberg, 2016), (Nevalainen, 2015) & (Nevalainen, 2022)

3.1 Ennakkohuolto-ohjelmat

Hätädieseljärjestelmän ennakkohuolto jakautuu dieselmoottorin, generaattorin ja dieselkiskon huoltoon. Epäkäytettävyyttä aiheuttavat huollot tehdään vuosittain vuosihuolloissa. Huoltotehtävät on ryhmitelty ohjelmiin, jotka suoritetaan vuoden, 2, 4, 8 tai 16 vuoden välein. 16 vuoden huolto on dieselin moottorin vaihto täysin huollettuun. Vaihto kestää normaalihuoltoa pidemmän ajan ja siksi se yleensä aloitetaan jo tehokäytön aikana ja saatetaan loppuun vuosihuollossa. Vaihtoa varten kyseinen dieselkisko yhdistetään Ahvenkosken voimalaitokseen. Huollot on paketoitu siten, että kun EY01-dieselmoottorilla on 8 vuoden huoltoaika, niin EY01-generaattorilla ja BU-kiskolla on myös 8 vuoden huolto.

Taulukko 3 Häädieseleiden huoltovuodet (Malmberg, 2016 s. 6)

KONE	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
11EY01	2	1	8	1	2	1	4	1	2	1	16	1
11EY02	1	4	1	2	1	8	1	2	1	4	1	2
12EY03	1	2	1	16	1	2	1	4	1	2	1	8
12EY04	8	1	2	1	4	1	2	1	16	1	2	1
21EY01	1	2	1	8	1	2	1	4	1	2	1	16
21EY02	4	1	2	1	8	1	2	1	4	1	2	1
22EY03	1	2	1	4	1	2	1	8	1	2	1	4
22EY04	2	1	4	1	2	1	8	1	2	1	4	1

Työturvallisuuden takia huollon aikana dieselmoottorin käynnistyminen on estetty ja sähköjärjestelmät ovat erottu sähköturvallisuusmääräyksien mukaisesti. Erityisesti dieselmotorkon erotus johtaa siihen, että kiskosta sähköön saavat turvajärjestelmät eivät ole käyttökuntoisia.

Häädieseljärjestelmien huoltosuunnitelmat sisältävät yksityiskohtaiset ohjeet säännöllisesti suoritettavista töistä. Nesteiden, niihin liittyvien suodattimien testaus- ja vaihtovälit, komponenttien tarkastukset ja mittausanturien tarkastus ja testaus, jotta koko järjestelmän kunto säilyy korkeana kunto säilyy käytettävyyden ja turvallisuuden maksimoimiseksi. Koska häädieseljärjestelmät ovat turvajärjestelmiä, 'run-to-failure' ei ole sallittua, vaan tavoitteena on tunnistaa kuluminen ennen kuin komponentti vioittuu ajon aikana.

Huolto-ohjelmat perustuvat valmistajan takuuvaatimuksiin, jotka taas perustuvat käyttö- ja huoltokokemuksiin samantyyppisillä komponenteilla myös ydinalan ulkopuolella. Lisäksi Loviisan voimalaitoksen kunnossapidon aikana kerätyt tiedot on otettu huomioon kunnossapitokonseptissa vaaditulla tavalla.

Kaikki Loviisan voimalaitoksen tehtävät merkittävät työt suunnitellaan, ajoitetaan, tehdään ja raportoidaan LOMAX-järjestelmässä. Työ voi johtua huoltosuunnitelmasta, viasta tai muutosprojektista. Minkä tahansa työn suunnittelussa on otettava huomioon useita työn näkökohtia (TTKE, työ-, säteily-, laitos- ja ympäristöturvallisuus). Erityisesti työturvallisuus vaatii järjestelmien erottamista (sähkö, paine, lämpötila). Häädieselgeneraattorin tapauksessa dieselin käynnistyminen estetään sulkemalla käynnistysventtiili. Kiskon

syöttökytkimet kytetään pois päältä ja estetään uudelleen kytkeytyminen (galvaaninen erotus).

Erotuksen hyväksynnästä lähtien järjestelmä ei ole käytettävissä. Järjestelmä palautetaan käyttökuntoon töiden jälkeen palauttamalla erotustoimet ja tekemällä koeajo määrääikaistestausmenettelyn mukaisesti (erityisesti turvajärjestelmät). Koko poissaoloaika on kirjattu 'käyttörajoitukseksi'.



Kuva 9 Dieselkoneen huoltoprosessi

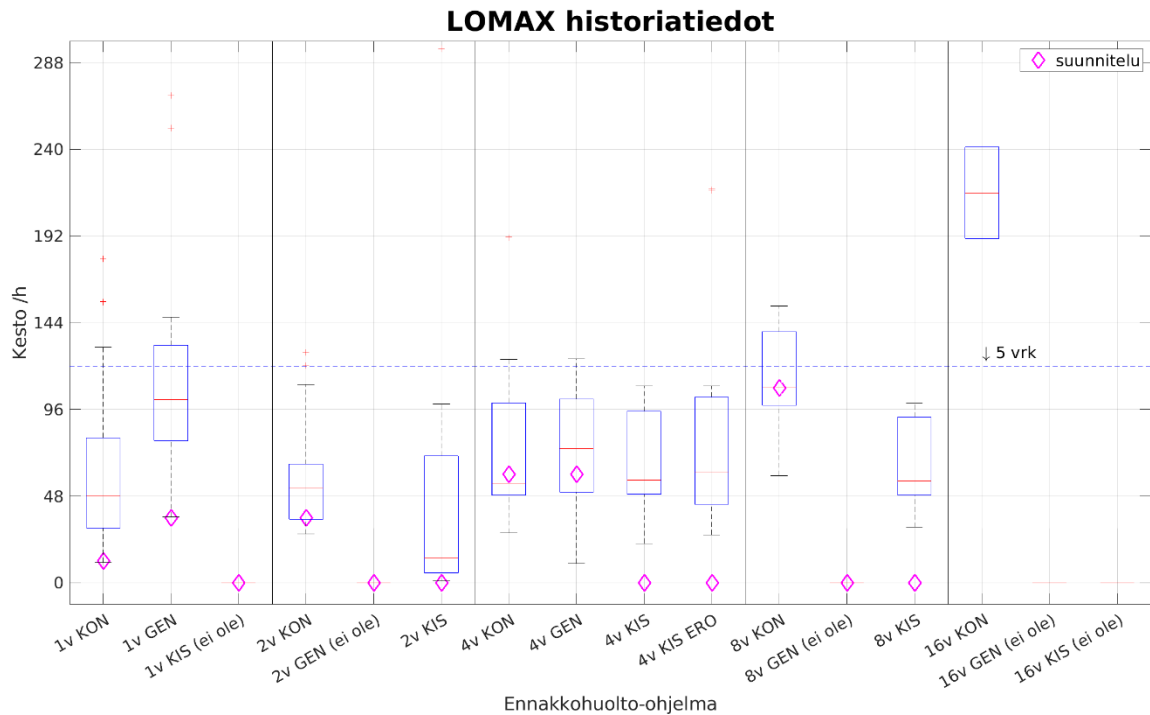
Turvajärjestelmien epäkäytettävyys pyritään minimoimaan. Dieselien ja kiskon erotusrajat asetetaan mahdollisimman lyhyiksi ja jaetaan pieniin osiin. Dieselkisko on tärkeä, koska sen käyttökuntoisuus on suoraan yhteydessä turvajärjestelmien käyttökuntoisuuteen. Koska dieselkisko voidaan syöttää muista lähteistä, vaikutus turvallisuuteen on osittain riippumaton muun hätädieleslin käyttökuntoisuudesta. Koko dieselkiskon erotus tarvitaan vain 4-vuotishuollossa.

3.2 Ennakkohuollon toteumat ja tilastollinen arviointi

Loviisan voimalaitoksen hätädielesjärjestelmien historiallisten tietojen arviointi tehtiin tarkastelemalla perusteellisesti toiminnanohjausjärjestelmästä LOMAX saatavilla olevia tietoja.

Tilastollista arviointia varten yksittäisen työmääräinten keston ylärajaksi asetetaan 1,5 kertaa kvartiilien vaihteluväli, eli ero alemman ja ylemmän kvartiilin välillä. Yläaidan ylittävistä (ns. 'outliers') työtehtävistä tarkistetaan yksitellen dokumentoidut palautetiedot, esim. ongelmia tai löydöksiä jne.

Tärkeimmät syyt merkittävästi normaalia pidempiin huoltoaikoihin ovat olleet huoltopaketin sateenvarjon alla tehdyt korjaavat lisä- ja muutostyöt. Siksi niiden pidempi kesto oli pikemminkin suunniteltu kuin odottamattomien löydösten tulos.



Kuva 10 LOMAX Statistiikka

Analyysin oikeellisuuden takia on tärkeää, että LOMAX-järjestelmästä saatu tietojen määrä olisi tilastollisesti riittävää. Käytettävissä olevat tiedot antavat korkeintaan hieman yli 60 arvoa moottorin 1-vuosihuollolle. Toisille on saatavilla vain 10 - 25 arvoa, joissakin tapauksissa sitä vähemmän. Merkitykselliset tilastolliset arvioinnit tarvitsevat paljon enemmän arvoja, mutta yleiskuvan saamiseksi tietojen määrät ovat riittävät. LOMAX:sta saatujen tietojen perusteella on esitetty ennakkohuoltojen toteutuneet kestot kuvassa 10.

Taulukko 4 Huollon kestot - oikea kestot 12 h-työpäivä-perustella (LOV, 2022)

Huolto ohjelma	1 v		2 v		4 v		8 v	
	Toteutunut	Suunniteltu	Toteutunut	Suunniteltu	Toteutunut	Suunniteltu	Toteutunut	Suunniteltu
Dieselmotori	59	12	58	36	72	60	113	108
Generaattori	116	36	-	-	74	60	-	-
Kisko	-	-	(51)	(36)	67	36	(66)	(36)

3.3 Dieselvian deterministinen arviointi

Saksassa käytetään yksinkertaista muistisääntöä mm. palokunnassa, Saksan punaisessa ristissä ja laitoksen teknisessä tuessa, mikä auttaa muistamaan polttomoottorin käyttökuntoisuuteen olennaisesti vaikuttavat asiat. Käytetty lyhenne on "WOLKE" (pilvi): (Kühl-)Wasser – (Jäähdytys-)Vesi, Öl/Oel – Ölly, Luft – Ilma, Kraftstoff – Polttoaine, (Start-)Energie – (Startti-)Energia

Taulukko 5 näyttää valikoiman mahdollisia dieselmoottorin vian syitä. Etenkin luonnon aiheuttamaa "ennakoimatonta ympäristötapahtumaa" voi olla vaikea ennustaa ja estää. Esimerkiksi jäähdytysvesisyötön tukkeutuminen jäätymisestä johtuu fysiikan laista ja tarvittavat vastatoimet sen estämiseen ovat suhteellisen helppo toteuttaa. (Jänkälä;ym., 2021b s. 10) Materiaalin väsymisestä, lisääntyneestä kulumisesta, säätötarpeesta jne. aiheutuvia järjestelmän sisäisiä vikoja vähennetään huolto- ja tarkastusohjelmilla. Lisäksi niitä seurataan tarkasti vuorohenkilökunnan päivittäisillä kierroksilla.

Taulukko 5 Deseleiden vikamatriisi

Välttämätön tarve		Mahdollinen vikaantumistapa	Vaikutusten ehkäiseminen
W	Vesi	tukkeutunut merivesitunneli	arvaamaton ympäristötapahtuma
		vesipumppu rikki (Fukushima I)	Rakentaminen tulvasuojaus
O	Ölly	alhainen öljytaso	päivittäiset kierrokset, määräaikainen testi ja huolto
		tukkeutunut öljynsuodatin	määräaikainen testi ja huolto
L	Ilma	liian kuuma tuloilma (ulkoinen tuli)	palokuorman kielto arvaamaton ympäristötapahtuma
		tukkeutunut ilmansuodatin	määräaikainen testi ja huolto
K	Polttoaine	tukkeutunut polttoainesuodatin	määräaikainen testi ja huolto
		puuttuu tai huonolaatuinen polttoaine	päivittäiset kierrokset ja saapumisanalyysi
E	Energia	viallinen apulaitekisko	määräaikainen testi ja huolto
		viallinen paineilmajärjestelmä	päivittäiset kierrokset ja LOMAX seuranta

		viallinen automaatiojärjestelmä	määräaikainen testi ja huolto
--	--	---------------------------------	-------------------------------

3.4 Dieseleiden ennakkohuolto Saksassa

Toisin kuin Suomi, Saksa päätti lopettaa ydinvoiman kaupallisen käytön sähköntuotantoon. Tällä hetkellä (kesällä 2022) jäljellä olevat kolme toiminnassa olevaa ydinvoimalaa ovat Siemens KWU:n KONVOI-tyyppisiä ('80-sarja). Hieman vanhempi esi-KONVOI-sarja ('3-sarja) on jo poistettu käytöstä.

Työt varten kysyttiin tietoja hätädieseleiden huolloista neljältä Saksan laitokselta, joista kaksi suostui antamaan tietoja. Tavoitteena oli saada vertailevaa tietoa huolto-ohjelmien sisällöistä ja kokemuksista. Ydinteknologian tiukan kansainvälisen vientimääräyksen vuoksi tiedot annettiin suullisesti puhelinhaastatteluissa. Kirjoittaja päätti pitää laitosten nimet luottamuksellisina ja rajoittaa tunnistamisen esi-KONVOI- ja KONVOI-tyyppiseen laitokseen. Vaikka kyseinen esi-KONVOI laitos on poistettu jo käytöstä, tulee sen turvajärjestelmät ja niiden hätädieseljärjestelmät pitää vielä käyttökunnossa.

Voimalaitokset ovat melko samankaltaisia toistensa kanssa, etenkin mitä tulee redundanssikonseptiin ja sähköjärjestelmien suunnitteluun, mukaan lukien hätädieselgeneraattorit. Molemmat laitokset ovat 4-luuppisia painevesireaktoreita, joiden lämpöteho on $P_{th} > 3\,750$ MW, eli noin $P_{el} > 1\,300$ MW. Turvajärjestelmät on suunniteltu neljään redundanssiin, joista kukin kattaa 50 % tarvittavasta onnettomuuskapasiteetista. Kuvassa 11 näkyy molempien laitosten sähköjärjestelmät. Loviisan ja Saksan laitoksen suunnittelussa on noudatettu osin samoja määräyksiä ja siten molemmissa laitoksissa on kaksi 400 kV kantaverkkoyhteyttä ja 110 kV kantaverkkoyhteys laitoksen omakäyttöä varten. Saksan laitoksilla 8 hätädieseliä yksikköä kohden. Niistä neljän sähköteho on $P_{el} > 5$ MW ja muiden neljän sähköteho on $P_{el} > 0,75$ MW.

Kaikki hätädieselgeneraattorit ovat saman valmistajan tuotteita. Huoltoaikataulut ja kunkin kunnossapitosuunnitelman sisältö ovat samankaltaiset kuin Loviisan voimalaitoksella. (KONV, 2022) & (pKONV, 2022)

Erityisesti KONVOI-laitossarjan (analogisesti merenkulun sanan kuljetussaattue [engl.: convoy] kanssa,) tavoitteena oli rakentaa yhteisiin standardeihin perustuvia standardilaitoksia, jotta lisensiointiprosessi ja käyttö- sekä kunnossapitomenettelyt voidaan myös yhtenäistää. Tästä huolimatta jokainen ydinvoimalaitos Saksassa on ainutlaatuinen ja

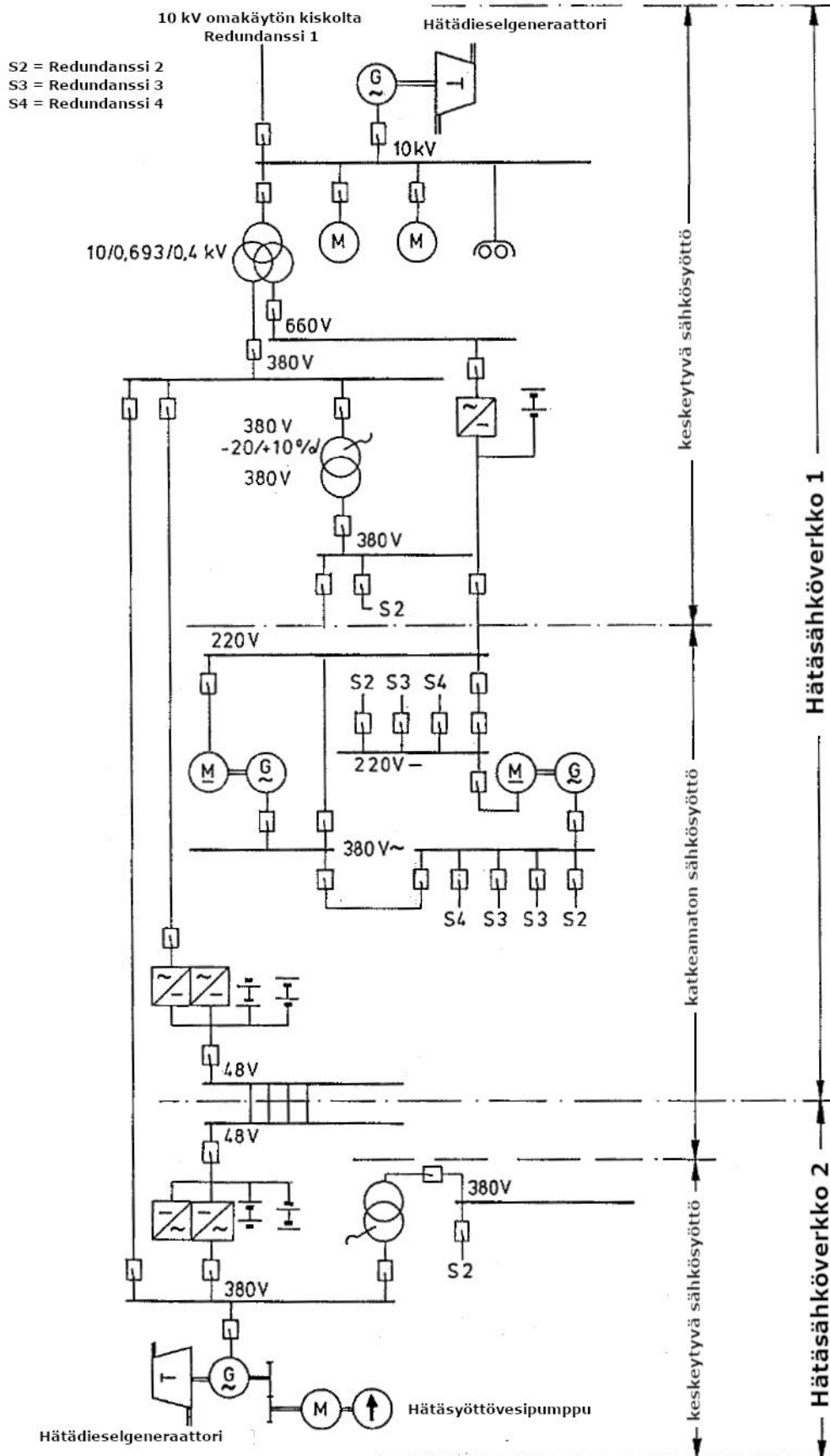
jokaisella omistajalla on omat huolto- ja seisokkimenettelyt jopa samanlaisille tai samoille laitteille. Erot yksittäisten yksiköiden välillä jopa KONVOI-sarjassa johtuvat rakennusprosessista saaduista opeista sekä muiden maiden kokemuksista. Eroihin vaikuttavat myös erilaiset ympäristö-olosuhteet, kuten käytettävissä olevat jäähdytysveden määrät ja lämpötilat sekä hieman erilaiset vaatimukset Saksan osavaltioiden viranomaisilta.

Vaikka laitosten kunnossapitokäytännön kehittäminen on tehty itsenäisesti, yleis- ja ydinkunnossapidon parhaista käytännöistä viestitään saman yhtiön laitosten kesken mutta myös eri yhtiöiden kesken. Tämän johdosta haastatteluissa tuli esille hyvin samankaltaiset menettelyt. (pKONV, 2022) & (KONV, 2022)

Yleisesti ottaen turvajärjestelmän kunnossapitomenettelyt, epäkäytettävyyksien- ja erotusten hallinta, työmääräysten ja koeajojen käsittely ovat samankaltaiset myös Loviisan voima-laitoksen menettelyjen kanssa. Saksassa ydinvoimalaitosten pitää lähettää kattava suunnitelma koko dieselhuoltokampanjasta etukäteen hallinnollinen viranomainen ja tekninen tarkastuslaitos tarkastettavaksi ja hyväksyttäväksi. Haastatteluissa tuli esille, että suunnitellun työajan pitäminen on erittäin tärkeitä. Määräajan pidentäminen viidellä päivällä on/oli mahdollista, mutta se vaati laillisen viranomaisen² hyväksynnän. Riippuen suoritettavan kunnossapidonohjelman työmäärästä käytettyjen työntekijöiden määrä vaihteli. (pKONV, 2022) & (KONV, 2022)

Ennen huolletun dieseljärjestelmän virallista koeajoa tehdään sisäinen koeajo odottamattomien vikojen välttämiseksi. Epävirallisten koeajojen kestot vaihtelevat laitoskohtaisesti ja niitä käsitellään seuraavissa alaluvuissa. (pKONV, 2022) & (KONV, 2022)

² Saksassa ydinlaitosten valvonnan tekninen osa on delegoitu ulkopuoliselle organisaatiolle (esim. Technischer Überwachungsverein – TÜV)



Kuva 11 esi-KONVOI- ja KONVOI-laitoksen sähköjärjestelmä, redundanssi 1 (Ziegler, 1985 s. 95)

3.4.1 esi-KONVOI-tyyppisen laitoksen käytännöt

Tämän alaluvun tiedot on saatu esi-KONVOI-voimalaitoksen dieselhuoltoedustajan haastattelusta. (pKONV, 2022) Haastateltavalla oli noin 20 vuoden kokemus hätädieseleiden huollosta. Hän oli osallistunut yli 150:een dieselin huoltoon.

Tällä laitoksella hätädieseljärjestelmien tehtiin huollot tehtiin aluksi pääosin tehokäytön aikana. Viimeisten käyttövuosien aikana käytäntöjä muutettiin siten, että ennakkohuollot tehtiin suurilta osin vuosihuolloissa. Haastateltava ei kyennyt sanomaan, mihin tämä päätös perustui.

Tehokäytön aikana tehtävän ennakkohuollon kesto oli 5 työpäivää. Tällöin huollettiin vain dieselmoottori ja -generaattori. Vastaava dieselkisko huollettiin latausseinokkien aikana. Kaikki hätädieseljärjestelmät huollettiin peräkkäin 8 viikon aikana, jotta välttyttiin ulkopuolisten asiantuntijoiden tarpeettomilta matkakuluilta.

Ennen huoltoa diesel käynnistettiin ja synkronoitiin noin 10 minuutin ajaksi verkkoon käyttökuntoisuuden osoittamiseksi. Muiden dieseljärjestelmien käyttökuntoisuutta ei tarvinnut osoittaa ylimääräisillä koestuksilla. Dieseleille ei saanut tehdä ennakkovalmisteluja ennen dieselin erotusta kuten telineiden rakentamista maanjäristysriskien takia. Tässä voimalaitoksessa dieseleiden huoltojen jälkeiset sisäiset koeajot olivat 4 tuntia. Virallinen koeajo tehtiin sisäisen koeajon jälkeen ja sen kesto oli 2 tuntia yhden, kahden ja neljän vuoden kunnossapidonohjelmassa. 8 vuoden välein tehtävän koeajon oli kestettävä 72 tuntia latausseinokin aikana.

Noin 10 huoltotapauksessa (eli noin 7 %) suunniteltu 5 päivää ei riittänyt. Yhdessä tapauksessa syynä oli yhteisvika neljässä dieselgeneraattorissa, mikä tarkoitti laitoksen alasajoa seisokkiin.

3.4.2 KONVOI-kohtainen käytäntö

Tämän alaluvun tiedot on otettu KONVOI-tehtaan dieselhuoltoedustajan haastattelusta. (KONV, 2022)

KONVOI-voimalaitoksella dieseljärjestelmän huolto jakautuu pieneen ja suureen huollonohjelmaan. Pieni huolto-ohjelma tarkoittaa yhden ja kahden vuoden välein tehtäviä huoltoja. 14 päivää kestävä huolto-ohjelman aikana huolletaan koko redundanssi mukaan lukien dieselkisko. Suuri huolto-ohjelma tehdään 4 ja 8 vuoden välein ja se kestää 5 - 7

päivää. Huolto koskee vain dieselmoottoria ja generaattoria. Dieselkiskoa ei tällöin huolleta. Kaksi kyseisen redundanssin dieselmoottoria (iso ja pieni) huolletaan samalla viikolla.

Tässä voimalaitoksessa saa tehdä ennen varsinaista turvajärjestelmän epäkäytettävyyttä ja sen jälkeen valmistelutöitä (esim. telineiden, työkalujen ja varaosien sijoitus, työkalujen testaus jne.), jotka eivät vaikuta hätädieselgeneraattorin käyttökuntoisuuteen. Muiden dieseljärjestelmien käyttökuntoisuus varmistetaan määräaikaisella koestuksella ennen valitun dieselgeneraattorin huollon aloitusta.

Edellytyksenä huollon aloitukselle on, että laitos on tehokäytöllä eikä ole muita merkittäviä vikoja tai häiriöitä. Tämä tarkoittaa, että kaikki turvajärjestelmät ovat saatavilla. Sama koskee kaikkia ulkopuolisia 400 kV ja 110 kV yhteyksiä kantaverkkoon.

4 TODENNÄKÖISYYSARVIOINTI

Tämä luku antaa yleiskatsauksen Loviisan voimalaitoksen PRA:sta. Ensimmäisessä luvussa kerrotaan tehokäytön ja seisokkitilojen erosta, hätädieseljärjestelmien tärkeydestä suojautumisessa sydänvaurioita vastaan.

Toisessa alaluvussa esitetään ja käsitellään nykyisen PRA-mallin antamia tuloksia tapauksessa, jossa hätädieselein ennakkohuoltoja siirrettäisiin seisokkitiloista tehokäytön ajalle.

4.1 Taustaa

Ydinenergialaki 1987/990 vaatii §7d:ssä riskianalyysin laatimisen. toimilupahakemuksesta §7d:ssä riskianalyysin. Riskianalyysin muoto ja laajuus on määritelty kohdassa YVL A.7. Loviisan voimalaitoksen riskianalyysille on määritelty seuraavat päätavoitteet (Sirén;ym., 2021 s. 4):

1. *Loviisa 1 ja 2 voimalaitoksen sydänvaurio- ja päästöriskin arviointi*
2. *Riskin kannalta tärkeiden onnettomuusketjujen, järjestelmien, laitteiden ja toimintojentunnistaminen*
3. *Mahdollisten muutostarpeiden tunnistaminen ja niistä tiedottaminen yhtiössä päätäville elimille*
4. *Tiedon tuottaminen myös sen arvioimiseksi, kuinka todennäköisesti suojarakennus ohittuu sydänvauriutilanteissa*
5. *Käyttö- ja kunnossapitohenkilöstön tietoisuuden lisääminen riskiä hallitsevista tekijöistä, niiden estämisestä ja lieventämisestä*

Klassinen käsitys riskistä on yhtä kuin tapahtuman todennäköisyys kertaa sen aiheuttama vahinko. PRA:ssa tulokset esitetään yleensä kuinka usein vuodessa tietty tapahtuma ilmenee. Ydinvoimalaitokselle, jossa on useita tuhansia komponentteja ja useita vuorovaikutuskerroksia, johtaa varsin monimutkaiseen sydänvauriotaajuuden laskemiseen yksittäisen komponentin vikaantumisesta. Riskitutkimus tehdään kolmella tasolla: Taso 1 – Järjestelmäanalyysi, Taso 2 – Suojausrakennusanalyysi ja Taso 3 – Seurausanalyysi. Tason 3 analyysien tekeminen on vapaaehtoista. (Sirén;ym., 2021 ss. 4-7) Järjestelmätasolla analysoidaan järjestelmien vikojen todennäköisyyksiä ja sen vaikutuksia ytimen eheyden

turvallisuuteen. Toisella tasolla analysoidaan radioaktiivisen aineen leviämisen estämistä ja ympäristöön pääsemisen todennäköisyyttä. Kolmannella tasolla analysoidaan radioaktiivisten aineiden päästöjen seurauksia väestölle ja ympäristölle.

Ensimmäinen kattava ydinvoimalaitosten riskiarviointi, joka soveltuu ydinvoimaloiden kaupallistamisen nykyiseen laajuuteen, on vuonna 1975 tehty Rasmussenin tutkimus. Aiemmin tehtyjen tutkimukset kohdentuivat vain yksittäisiin voimalaitoksiin ja analyysit olivat hyvin suppeita (esim. Brookhaven National Laboratory:n (BNL) tutkimus WASH-740 vuodelta 1957 (USNRC, 1957)) Rasmussenin hyödynsi tutkimuksessa Boeingin ja NASA:n kehittämää vikapuukurakennetta. (Rasmussen, 1975 ss. 1-2)

Vikapuu on graafinen apu, joka havainnollistaa yksittäisten komponenttien ja niiden yhdistelmien epäonnistumisen seurauksia. Puupolkujen vikojen välisten yhteyksien ja yksittäisten todennäköisyyksien avulla lasketaan todennäköisyydet järjestelmän vioista ja lopuksi sydänvaurion tai radioaktiivisen aineen vapautumisen todennäköisyys ilmakehään. Laskentaa varten ohjelmistoon syötetään yksittäisten tapahtumien todennäköisyydet. Laitevikojen kohdalla puhutaan epäkäytettävyydestä, jonka yksi parametri on vikataajuus. Nämä vikataajuustiedot voidaan kohtuullisen luotettavasti saada laitteiden valmistajilta. Erityisesti turvajärjestelmissä käytetään jo luotettaviksi todistettuja komponentteja muilla korkeaa laatua vaativilla aloilla (esim. kemianteollisuudessa). Vielä tarkemman analyysituloksen saamiseksi Loviisan voimalaitos käyttää valmistajien ilmoitusten lisäksi omaa käyttökokemustietoa laitteista (ns. Living PRA). Laitevikoja kuvaavista tapahtumista suurin osa perustuu laitoskokemukseen nykyään. (Eloranta, 2022 s. 3)

4.1.1 Laitoksen tehokäyttötilat ja PRA-tulokset

Tehokäyttö Loviisan voimalaitoksella on teknisesti määritelty suhteellisen neutronivuon avulla. Kun neutronivuo on yli 2 % täydestä neutronivuosta, on laitos tehokäytössä. PRA-mallissa tehokäytön tiloiksi on määritetty ovat tilat A, P ja Q. Näissä tiloissa primääripiiri on tiivis, paineistettu ja reaktorissa on itsensä ylläpitävä ketjureaktio.

PRA:n tulokset joulukuussa 2021 sydänvauriotaajuuden (Taso 1) osalta ovat Loviisa 1 laitousyksiköllä $P(LO1) = 6,12E-6 \text{ a}^{-1}$ ja vastaavasti Loviisa 2 laitousyksiköllä $P(LO2) = 7,08E-6 \text{ a}^{-1}$.

Tehokäytön (T) osuus sydänvauriotaajuudesta on noin $P(T,LO1) = 51,3 \%$ ja $P(T,LO2) = 59,6 \%$ (Paavola;ym., 2021 s. 1). Tehokäyttöaika on noin 92,6 % vuodesta.

4.1.2 Laitoksen seisokitilat

Kun reaktori sammutetaan, jälkilämpö vähenee ajan myötä. Niin kauan kuin primääripiiri on tiivis ja kaikki turvallisuusjärjestelmät ovat saatavilla, laitos muuttuu "turvallisemmaksi" ajan myötä, koska polttoaineen tehokkaaseen jäähdyttämiseen tarvitaan yhä vähemmän kapasiteettia. Laitoksen seisokitilat jaetaan primääripiirin lämpötilan mukaan kuumaan tai kylmään seisokitilaan.

Käyttötilan määrätymiseen seisokitiloissa vaikuttavat mm. primääripiirin lämpötila ja tiiveys, reaktorin kansi paikallaan, reaktorin pinta, käytettävissä olevan veden määrä tai mitkä turvajärjestelmät ovat käytettävissä.

PRA:n nykyiset tulokset viittaavat siihen, että seisokin aikaiset viat vaikuttavat herkemmin sydänvaurion taajuuteen. Siten kaikki mikä vähentää turvallisuusjärjestelmien epäkäyttävyyttä tänä aikana, parantaa laitoksen yleistä turvallisuutta.

Seisokkien (S) osuus sydänvauriotaajuudesta on noin $P(S,LO1) = 48,7 \%$ ja $P(S,LO2) = 40,4 \%$. (Paavola;ym., 2021 s. 1) Seisokitilat vastaavat noin 7,4 % vuodesta.

4.1.3 Diesel järjestelmät

Kaikki Loviisan voimalaitoksen turvajärjestelmät kolmea järjestelmää lukuun ottamatta ovat aktiivisia järjestelmiä, joten ne tarvitsevat sähköä tehtäviensä suorittamiseen. Siten sähkösyöttö on erittäin tärkeä osa onnettomuuksien hallintaa. Sähkösyötön saatavuus on ratkaisevan tärkeää kaikissa käyttötiloissa. Olettaen, että yksikön kaikki neljä hätädieseljärjestelmää vikaantuvat yhtäaikaan, sydänvaurion riski kasvaa 50 % LO1:n ja 60 % LO2:n osalta. (Jänkälä;ym., 2021a s. 7)

Varavoimadieseljärjestelmä EY07 on otettu huomioon PRA:ssa vuodesta 2013 lähtien. Se vähensi sydänvaurioiden riskiä $\Delta P(EY07) = 1E-7 a^{-1}$:llä. (Jänkälä;ym., 2021a s. 24)

5 TULOKSET

Tässä luvussa on esitetty vaihtoehdot hätädieseljärjestelmien ennakkohuoltojen ajankohdille ja niiden vaikutukset sydänvaurion taajuuteen.

5.1 Vaihtoehdot

Edellisissä luvuissa esitettiin kunnossapitosuunnitelman muutoksen päätöksen hakuprosessin kannalta olennaiset seikat. FORDEC-kaavion noudattamiseksi on määriteltävä selkeät vaihtoehdot. Seuraavat vaihtoehdot voidaan johtaa nykyisestä TTKE:n antamasta viitekehystä:

Taulukko 6 Vaihtoehdomatriisi

Vaihtoehto	Dieselkone	Generaattori	Kisko
0 (nykyinen tilanne)	Kaikki revisiossa		
1	1v Tehojolla 2v, 4v, 8v Revisiossa	1v Tehojolla 4v Revisiossa	2v, 8v, Tehojolla 4v Revisiossa
2	Kaikki tehoajolla		
3	Kaikki tehoajolla		Kaikki revisiossa
4	Kaikki revisiossa		Kaikki tehoajolla

Laitoksen turvajärjestelmien käytettävyyden kannalta tärkein osa hätädieseljärjestelmistä on vastaava kisko. Dieselkiskon epäkäytettävyys johtaa kaikkien siitä sähkönsyötön saavan turvallisuusjärjestelmän epäkäytettävyteen. Tätä käsitellään yksityiskohtaisesti luvussa 2.5. Dieselmoottori ja generaattori nähdään yhtenä kokonaisuutena, koska molempia tarvitaan sähköntuotantoon.

Taulukko 6 näyttää neljä vaihtoehtoa dieselin, generaattorin ja dieselkiskon ennakkohuoltojen ajoitukseen.

Vaihtoehto 0

- Nykyinen tilanne, joka on lueteltu vertailua varten.

Vaihtoehto 1

- Vaihtoehdossa ennakkohuollot, jotka pystytään tekemään nykyisen TTKE:n sallimassa korjausajassa tehdään käynnin aikana. Muut sitä pidemmät huollot tehdään vuosihuollossa

Vaihtoehto 2

- Kaikki järjestelmän ennakkohuollot tehdään tehokäytön aikana.

Vaihtoehto 3

- Generaattorin ja moottorin ennakkohuolto tehdään tehokäytön aikana
- Vuosihuollossa tehdään dieselmiskon ennakkohuollot.

Vaihtoehto 4

- Dieselmoottorin ja generaattorin huolto tehdään vuosihuollossa
- Dieselmiskon ennakkohuollot tehdään käynnin aikana.

5.2 PRA arvot vaihtoehdoille

Kaikki moottorin/generaattorin huolto-ohjelmat vaativat erotuksen työturvallisuuden vuoksi, jolloin järjestelmä on epäkäytettävä. Lomax-järjestelmästä saaduista tiedoista on laskettu huoltojen keskimääräiset kestot ja vaihteluvälit. Generaattorilla ei ole 2- ja 8-vuotishuolto-ohjelmaa vaan sitä ylläpidetään 1- tai 4-vuotisen ohjelman mukaisesti.

Pisin aika huolto-ohjelmien välillä on 16 vuotta. Kaikki muut ohjelmat toistetaan lyhyemmillä jaksoilla. Siksi yli 16 vuoden keskiarvo kattaa kaikki ohjelmat ja johtaa tasaiseen jakautumiseen yksittäisen ohjelman osalta. Yksityiskohtainen laskentataulukko PRA-tuloksista yksittäisille vuosille löytyy liitteestä 5.

Vaihtoehto 0:

- Nykyinen tilanne, joka on lueteltu vertailua varten.

Vaihtoehto 1:

- 16 vuoden jaksossa yhden vuoden huolto-ohjelma suoritetaan 8 kertaa. Siksi keskimääräinen epäkäyttävyys vuodessa on puolet taulukon 4 vuoden maksimiarvosta (generaattori 116 h) arvosta, eli 58 tuntia. Dieselniskohuolto ei aiheuta epäkäytettävyyttä, koska tälle vaihtoehdolle kiskojen ennakkohuollon ajoitus ei ole muuttunut, joten sen arvo on 0 tuntia.

Vaihtoehto 2:

- 16 vuoden jakson aikana moottorille ja generaattorille voidaan laskea taulukon 4 arvoilla (maksiarvot 116 h, 116 h, 74 h, 113 h), keskimäärin 110,4 tuntia vuodessa. Dieselniskolle arvot johtavat keskimäärin 8,4 tuntiin vuodessa (67 h joka kahdeksas vuosi). Jatkoarvioinneissa käytetään konservatiivisesti 111 tuntia ja 9 tuntia vuodessa.

Vaihtoehto 3:

- Moottorille/generaattorille otetaan sama keskiarvo kuin vaihtoehdossa 2 (110,3 h). Dieselniskon arvo on 0 tuntia.

Vaihtoehto 4:

- Moottorin/generaattorin arvo on 0 tuntia. Kiskolle otetaan sama keskiarvo kuin vaihtoehdossa 2 (8,4 h).

5.3 Vaihtoehtojen käsittely ja tulokset

PRA-mallissa laskettiin periaatteessa komponenttien epäkäytettävyyden vaikutus sydänvauriotaajuuteen. Vaihtoehtojen laskennassa ei muutettu ennakkohuoltojen sisältöä. Yksittäisen osajärjestelmän (moottori/generaattori ja virtakisko) luotettavuus ei muutu muuttamalla huollon ajankohtaa. Siksi viime kädessä sydänvauriotaajuuden muutos tapahtuu seisokkiajan epäkäytettävyyden vaihtamisella tehokäytönaikaan.

Lopullista johtopäätöstä varten aikasiirtymät on laskettava pisimmälle huoltojaksolle (eli 16 vuotta), koska yksittäisillä huolto-ohjelmilla on eri esiintymistiheydet. Tulokset näkyvät taulukossa 7.

Tarkasteltaessa annettuja vaihtoehtoja yksityiskohtaisesti voidaan huomata seuraavat asiat:

- Vaihtoehto 1 on erikoisversio vaihtoehdosta 3
Dieselkiskon 2- ja 8-vuotisen huolto-ohjelman aikana ei aiheuteta kiskon epäkäytettävyyttä. PRA:n näkökulmasta muutetaan vain tällä hetkellä keskimääräinen vuosihuollon huoltoaika (vuosiohjelman moottorin ja generaattorin seisokkien enimmäismäärä taulukosta 4.
- Vaihtoehto 2 on valinnan 3 ja vaihtoehdon 4 painotettu summa
Osajärjestelmien moottori/generaattori ja dieselkisko ovat lähes riippumattomia, joten osajärjestelmien todennäköisyyksien muutos voidaan yksinkertaisesti laskea yhteen. Huomiota on kiinnitettävä, että osajärjestelmien riippumattomuudesta ja epäkäytettävyydestä johtuen on tarkasteltava kunkin osajärjestelmän osalta erikseen.

Tulokset osoittavat, että dieselkiskon ennakkohuollon muutoksen vaikutus sydänvauriotaajuuteen on noin 6 kertaa suurempi kuin moottorin/generaattorin (yhden seisokitunnin vaihto yhteen tuntiin tehokäyttöaikana). Dieselkiskon epäkäytettävyyksaika on 16 vuoden aikana on keskimäärin vain noin kahdestoistaosa moottorin/generaattorin epäkäytettävyyksajasta. Siksi kiskon osuus keskimääräisessä todennäköisyyden parantumisessa on suhteellisen pieni.

Puhtaasti teknisestä ja toiminnallisesta näkökulmasta katsottuna molempia osajärjestelmiä (moottori/generaattori ja dieselkisko) tulisi ennakkohuoltaa tehokäytön aikana. Vaikutusta voidaan tehostaa lyhentämällä huoltoaikaa niin paljon kuin mahdollista. Dieselmoottorin ja -generaattorin 16 vuotishuollon aikana on suoritettava 8 vuoden huolto-ohjelma dieselkiskolle. Koska tämä huoltosuunnitelma ei vaadi erotusta työturvallisuuden vuoksi, sillä ei ole väliä tehdäänkö se tehokäytön aikana vai seisokkien aikana.

Todennäköisyys pienenee niin kauan kuin tekijää f ei alita. Koneelle/generaattorille $f_{KON/GEN} \geq 0,881$ kiskolle $f_{KIS} \geq 0,476$. Tekijät on esitetty graafisesti liitteessä 4

$$t_{teho} = \frac{t_{revisio}}{f} \quad (3)$$

t_x : ajat, $[t_x] = \text{h}$

f : faktori, $[f] = 1$

Taulukossa 7 on esitetty sydänvauriotaajuuden muutosten keskiarvot neljälle vaihtoehdolle. Tulokset perustuvat aiemmin esitettyihin ennakkohuoltojen kestojen keskiarvoihin. Ensimmäinen sarake näyttää ennakkohuoltojen toteutuneet keskimääräiset kestot ja toinen suunnitellut keskimääräiset kestot. Kolmas sarake näyttää sydänvauriotaajuuden muutoksen tapauksessa, jossa revision aikainen toteutunut kesto on siirretty vastaavan kestoisena tehokäytön ajalle. Neljäs sarake näyttää sydänvauriotaajuuden muutoksen tapauksessa, jossa revision aikainen toteutunut kesto on vaihdettu suunnittelun mukaisena kestoisena tehokäytön ajalle. Viimeisessä sarakkeessa esitetään sydänvauriotaajuuden muutoksen tapauksessa, jossa revision aikainen suunniteltu on siirretty vastaavan kestoisena tehokäytön ajalle.

Taulukko 7 Keskimääräiset tulokset

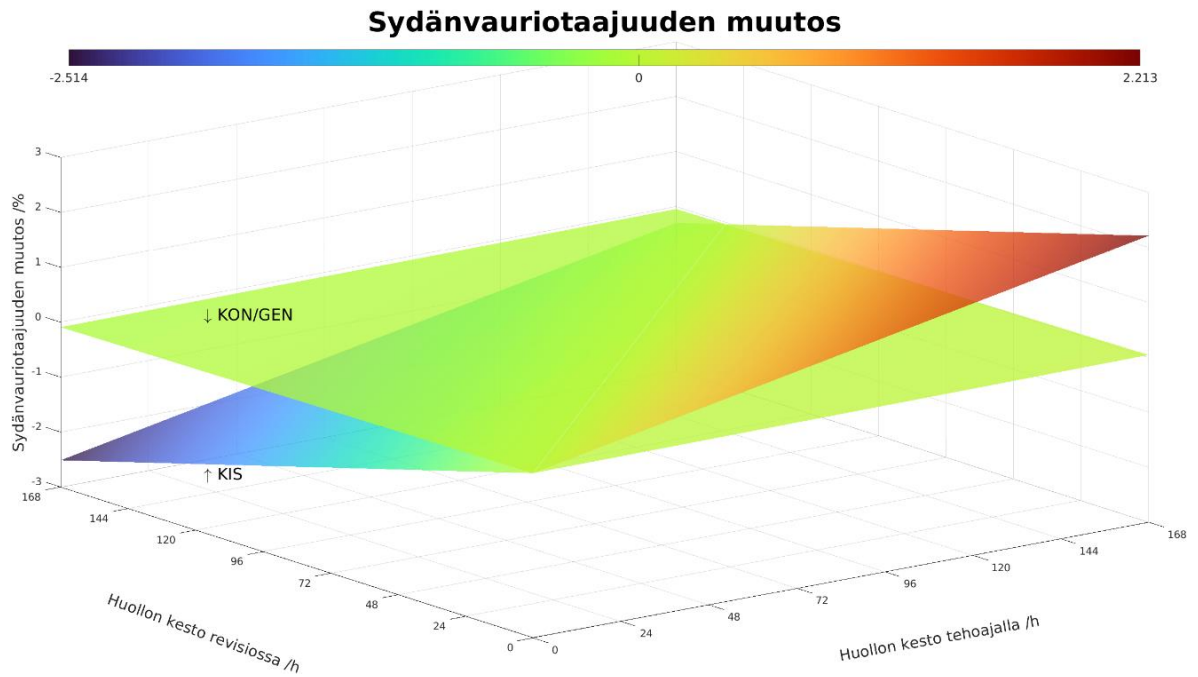
Vaihtoehto	Toteutunut KON/GEN / KIS (ka.) / h	Suunnittelu KON/GEN / KIS (ka.) / h	Todennäköisyys- vaihto tot : tot / %	Todennäköisyys- vaihto tot : suu / %	Todennäköisyys- vaihto suu : suu / %
0	- / -	- / -	±0,0000	±0,0000	±0,0000
1	58 / 0	18 / 0	-0,0164	-0,0266	-0,0050
2	111 / 9	48 / 5	<u>-0,0475</u>	<u>-0,1163</u>	<u>-0,0216</u>
3	111 / 0	48 / 0	-0,0314	-0,0475	-0,0136

4	0 / 9	0 / 5	-0,0161	-0,0688	-0,0080
---	-------	-------	---------	---------	---------

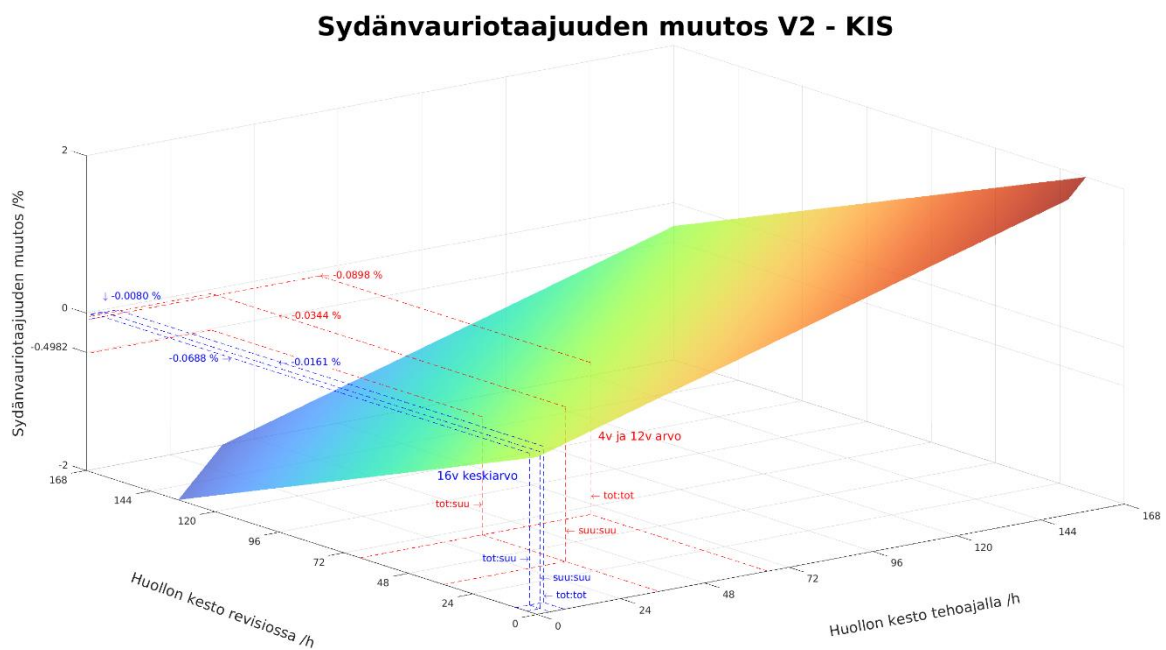
PRA-mallin mukaan suurin parannus sydänvauriotaajuuteen ($-0,553 \% \leq \Delta P_{V2} \leq -0,081 \%$, aikasiirrosta (tot:tot, tot:suu, suu:suu) riippuen) saadaan vaihtoehdolla 2, jossa kaikki ennakkohuoltotyöt tehdään käynnin aikana. Tämän vaihtoehdon sisällä suurin osuus parannuksesta tulee vuosina, jolloin virtakisko huolletaan käynnin aikana erotettuna (huoltorytmissä vuodet 4 ja 8). Tällöin kiskojen osuus on 80 - 95 % tuloksesta.

Kuvassa 12 on esitetty miten ennakkohuoltojen siirtäminen revisiosta tehokäytön aikaan vaikuttaa sydänvauriotaajuuteen. Osajärjestelmien (kone/generaattori ja kisko) todennäköisyysmuutokset ovat suoria tasoja. Dieselmoottori/-generaattorin ja -kiskon todennäköisyysmuutokset ovat esitetty erillisinä suorina tasoina. Tason projisoidut pisteet edus-tavat todennäköisyyden muutosta. Halutun arvon löytämiseksi aika-akseleista on piirrettävä ortogonaaliset viivat. Kaavion on tarkoitus antaa yleinen käsitys tuloksista. Yksityis-kohtaiset tulokset löytyvät taulukosta.

Kuvan 12 arvot ovat varsinkin reunoilla melko teoreettisia. Ajanmuutos $\pm 50 \%$ saattaa olla mahdollinen, joissakin tapauksissa ehkä enemmänkin, mutta muutosta 168:1 tai päinvastoin ei käytännössä voi tapahtua. Siksi sydänvauriotaajuuden muutos on välillä $\pm 1 \%$ tai vähemmän. Reuna-alueen arvot kuitenkin osoittavat kyseessä on kaksi erillistä tasoa.



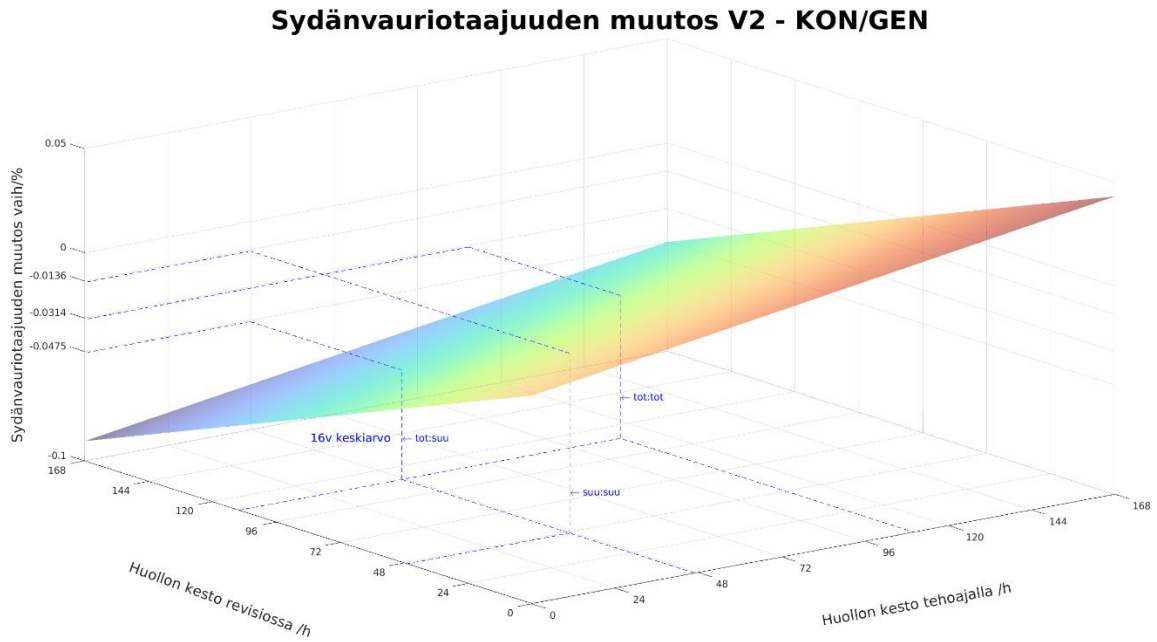
Kuva 12 Todennäköisyysmuutos



Kuva 13 Sydänvauriotaajuuden muutos toiselle vaihtoehdolle - kiskon osa

Vaihtoehto 2 tarjoaa parhaan arvon sydänvauriotaajuuden minimoimiseksi. Kuvassa 13 on graafinen arvio kiskojen ennakkohuollon vaikutuksesta 16 vuoden huollon keskiarvoilla kolmelle eri aikasiirtovaihtoehdolle (tot:tot, tot:suu, suu:suu) sinisellä. Kuvassa on lisäksi

esitetty punaisella sydänvauriotaajuuden muutos 4 ja 12-vuoden ennakkohuollon tapauksessa. Kuvassa 14 näkyy moottorin ja generaattorin ennakkohuollon osuus.



Kuva 14 Sydänvauriotaajuuden muutos toiselle vaihtoehdolle - moottorin ja generaattorin osa

6 EHDOTUKSET

Tässä luvussa esitetään suosituksia nykyisten ennakkohuoltojen toteutumisen ja PRA-laskelmien tuloksien perusteella. Esitettyjen muutosten vaikutukset ja riskit arvioidaan saatavilla olevien tietojen perusteella. Lisäksi annetaan suosituksia, kuinka varautua mahdollisiin riskeihin perustellusti.

Tämä on FORDEC-menetelmän vaihe R, joka koskee riskien hallintaa.

6.1 TTKE Muutokset

Nykyinen TTKE rajoittaa turvajärjestelmien suunniteltua ja suunnittelematonta epäkäytettävyyttä. Sääntöjen muutoksista on sovittava viranomaisen (STUK) kanssa. TTKE:ssä asetettujen arvojen tulee noudattaa YVL (eli YVL A.6 [738]) määräystä, kuitenkin tietty epävarmuusvara on mahdollinen.

6.1.1 Dieselgeneraattorit ja -koneet

Nykyinen TTKE ei salli käynnin aikana epäkäytettävyyttä aiheuttavaa ennakkohuoltoa.

Poikkeuksena on dieselin 16 vuoden välein tehtävä täyshuolto, jossa koko moottori vaihdetaan huollettuun. Tällöin sallittu huoltoaika on 21 vuorokautta edellytyksellä että Ahvenkosken voimalaitos on kytketty dieselkiskoon. Tähän poikkeustapaukseen ei tehdä ehdotuksia. (Ronkainen, 2021 ss. 4.2/6, 4.2/11) & (Ronkainen, 2021 s. 3.3.17/5)

Ehdotus

- Arvioinnin perusteella suositellaan, että hätädiezelgeneraattoreille sallittaisiin tehdä ennakkohuoltoa käynnin aikana enintään 5 vuorokautta vuodessa.
- Vaihtoehtonumero 1,2 ja 3, vaihtoehto 2 on suositeltava
- Perustelu
 - Suurin sydänvauriotaajuuden lasku (Taulukko 7)
- Edellytykset
 - YVL-ohje vaatii epäkäytettävyyksaikojen minimoimista. Tästä syystä työjärjestelyissä tulee varautua esim. 12 tunnin työpäiviin tai kaksi- tai kolmi-vuorotyöhön erityisesti jos ennakkohuollossa tulee tarve korjaavalle huollolle.

- Ennakkohuoltoon mahdollisesti liittyvien korjaavien huoltotöiden kesto tulee pitää mahdollisimman lyhyenä ja kokonaisaika ei saa ylittää viittä vuorokautta.

6.1.2 Dieselnäkököt

Tällä hetkellä TTKE ei salli dieselnäkökötön ennakkohuoltoa käynnin aikana. Vikatilanteessa TTKE sallii kolmen vuorokauden korjausajan, ja mikäli tämä ylitetään, tulee laitos ajaa seisokkitilaan.

Ehdotus

- Arvioinnin perusteella suositellaan, että hätädieselnäkökötölle sallittaisiin tehdä ennakkohuoltoa käynnin aikana enintään 2 vuorokautta neljässä vuodessa, koska dieselnäkökötön on erotetaan vain neljän vuoden välein tarvittavaan ennakkohuoltoon.
- Vaihtoehtonumero 2 ja 4, vaihtoehto 2 on suositeltava
- Perustelu
 - Suurin sydänvauriotaajuuden lasku (Taulukko 7)
- Edellytykset
 - YVL-ohje vaatii epäkäytettävyyssaikeiden minimoimista. Tästä syystä työjärjestelyissä tulee varautua esim. 12 tunnin työpäiviin tai kaksi- tai kolmi-vuorotyöhön erityisesti jos ennakkohuollossa tulee tarve korjaavalle huollolle.
 - Ennakkohuoltoon mahdollisesti liittyvien korjaavien huoltotöiden kesto tulee pitää mahdollisimman lyhyenä ja kokonaisaika ei saa ylittää kahta vuorokautta neljässä vuodessa (48 kuukaudessa).

6.2 Edellytykset

Dieselnäkökötön ennakkohuollon siirtämiseksi revisiosta tehokäyttöaikaan on alla esitetty seuraavat yleiset vaatimukset. Niiden tarkoitus on varmistaa mahdollisimman korkea turvallisuus. Edellytyksissä on otettu huomioon kokemukset Loviisan voimalaitoksesta, kahdesta vertailukohtana käytetystä voimalaitoksesta sekä tekijöiden omat käyttökokemukset.

1. Kaikki laitosyksikön turvallisuusjärjestelmät kunnossa.

Käynnin aikana tehtävien ennakkohuoltojen edellytys on että muut laitoksen turvajärjestelmät ovat käyttökunnossa.

2. Vain yksi dieseljärjestelmä on kerrallaan huollossa koko laitoksella

Tällä hetkellä Loviisan voimalaitoksella on käytäntö, jonka mukaan laitosyksiköllä on vain yksi diesel on kerrallaan ennakkohuollossa vuosihuollon aikana. Tätä käytäntöä tulisi laajentaa niin, että tehokäytön aikana tehtävää ennakkohuoltoa varten vain yksi diesel molemmista yksiköistä saa olla huollossa. Teknisesti on mahdollista kytkeä dieselkiskot yksiköiden välillä 10BY-kiskon kautta. Vaikka tätä ei oteta huomioon PRA-mallissa, se tukee olennaisesti sähkönsyöttöä laitosyksiköiden välillä hätätilanteessa.

3. Yhteydet valtakunnan verkkoon ja EY07 kunnossa

Sekä 400 kV että 110 kV verkkoliitännät tulisi olla käytettävissä. Lisäksi laitosdieseljärjestelmä EY07 tulisi olla käyttökunnossa hätädieseljärjestelmän ennako-huoltojen aikana. Sähköjärjestelmien käytettävyys on nähtävä kokonaisuutena ja siihen sisältyy yhteistyö Fingridin kanssa ja sen tulisi kattaa Haglundin, Anttilan ja Korian linjat ja muuntaja-asemat.

4. Ennakkohuoltojen ajankohta ja AHV saatavuus

Ahvenkosken vesilaitos voidaan kytkeä Loviisan 10BY-kiskoon. Yhden dieseljärjestelmän ollessa huollossa laitoksella on vielä käytettävissä yksittäisvika huomioiden kaksi dieseljärjestelmää (2 x 100 %), EY07-dieseljärjestelmä sekä mahdollisuus käyttää toisen yksikön dieseljärjestelmiä. Tämän johdosta AHV:n varaaminen Loviisan käyttöön ei ole välttämätöntä.

Dieselhuoltokampanja tulee suunnitellaan siten, että AHV ei ole huollossa eikä ole riskiä AHV:n menettämiseen esim. erittäin kylmän sään takia (suppo tai paksu jääkerros). Yhteyden käyttökuntoisuus tulee varmistaa ennen dieseleiden huoltokampanjaa. Lisäksi AHV:n varaaminen Loviisan voimalaitoksen käyttöön on erittäin kallista.

5. Ylimääräiset koestukset

Hätädieseljärjestelmät koestetaan neljän viikon välein. Tämän johdosta ylimääräisille koestuksille kuten KONVOI-laitoksella ennen huoltokampanjaa, ei nähdä olevan tarvetta.

Huoltoon menevälle dieselille tulisi tehdä lyhyt ylimääräinen koestus (mikäli ei ole samalla viikolla tehty), jotta tiedetään oliko vika olemassa ennen huoltoa vai tuliko se huollon aikana tai sen jälkeen.

6. Huoltoaikojen pitäminen mahdollisimman lyhyenä ja valmistelevat töiden tekeminen

Hyvä käytäntö on, että valmistelevat työt, kuten testaus, kalibrointi ja työkalujen varaaminen, väliaikaisten varastointialueiden jne. sijoittaminen, tulee tehdä ennen käyttörajoitusta. Loviisan erittäin alhaisen maanjäristysriskin vuoksi myös telinetyöt voitaisiin tehdä ennen käyttörajoituksia. (Jänkälä;ym., 2021a s. 2) Telineet tulee suunnitella siten, että seismisten vaikutuksen aiheuttamat vauriot ovat mahdollisimman vähäisiä. Aloituspäivänsä tulee huomioida telinetöiden riskimerkitys.

Tämä periaate tulisi myös hyväksyttää viranomaisella (STUK).

7. Käyttövuorojen vaihtojen sovitus ennakkohuoltoihin

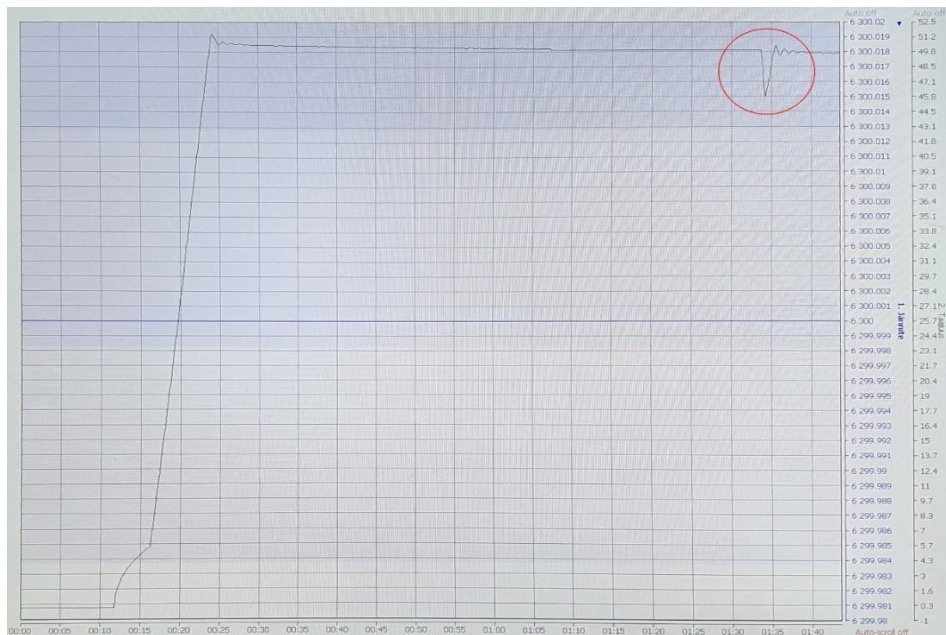
Vaikka 1- ja 8-vuoden huolto-ohjelmat eivät työturvallisuussyistä vaadi erotuksia, suojareleiden testi laukaisee kytkimet ja pysäyttää käyvät laitteet. Tämän johdosta laitteiden käyntivuorot tulee sovittaa siten että huollettavassa diesel-kiskossa on mahdollisimman vähän kuormia. Tämä koskee erityisesti VF-järjestelmää.

8. Kiskon erotus koeajon ajaksi

Ensimmäinen tapa on erottaa tarvittava dieselkisko ja normaalikäyttöinen kisko normaalikäyttökiskon sähkökatkoksen sattuessa. Diesel- ja normaalikiskojen erotus tapahtuu kuormitusuojareleen avulla. Tämän releen toimivuus testataan kerran vuodessa vuosihuollossa aikana. Jos tämän releen avautuminen epäonnistuu, koko normaalikiskon käyttökuorma jää dieselgeneraattorin varaan, mikä saisi

generaattorin katkaisijan avautumaan ja irrottamaan dieselgeneraattorin kiskosta. Dieselin saamiseksi takaisin syöttämään turvajärjestelmiä vaatii ohjaajien toimenpiteitä kiskojen erottamiseksi dieselin kytkemiseksi kiskoon.

Kuvassa 15 on esitetty simulaattorin antamat tulokset tapahtumasta, jossa diesel- ja normaalikisko ovat aluksi kytkettynä yhteen ja yhteys valtakunnan verkkoon menetetään. Tässä tapauksessa kiskojen kuormasuojausrele toimii onnistuneesti ja jännite laskee vain vähän eikä se vaikuta turvallisuusjärjestelmien toimintaan.



Kuva 15 Diesel- ja normaalikäyttökisko erotus 01:34 (LOKS2 APROS-mallista)

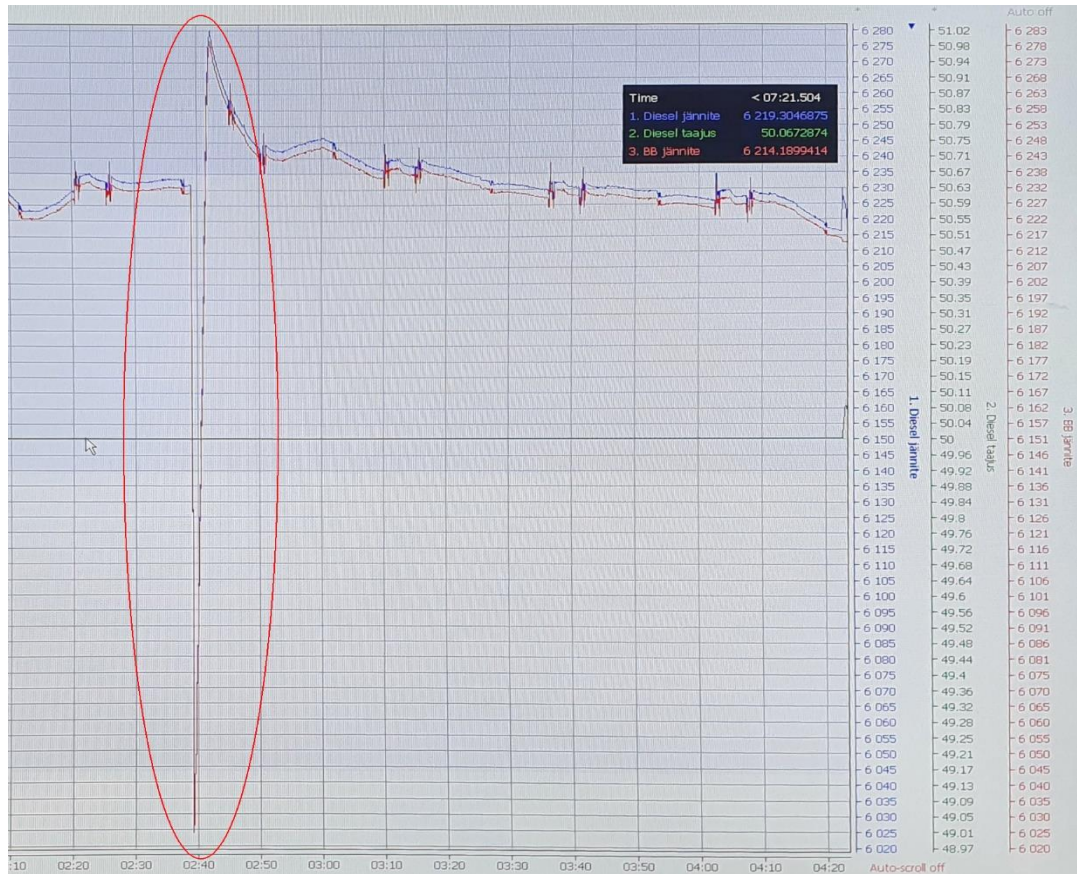
9. Isojen kuluttajien käynnistysten välttäminen koeajon aikana

Suurten kuluttajien käynnistäminen laskee aina hetkellisesti kiskon jännitettä. Vaikka Loviisan voimalaitoksen suurimmatkaan käyttöpumput (syöttövesipumput $P_{svp} \approx 2$ MW) eivät aiheuta dieseljärjestelmän suojausta jännitehäviöstä, tällaisia kytkentätoimintoja ei kuitenkaan tulisi tehdä dieselkoeajojen aikana.

Kuvassa 16 on simulaattoritulokset dieselkiskon jännitteen alenemisesta syöttövesipumpun kytkeytyessä kiskoon. Kuvassa 17 näkyy jännitehäviö syöttövesipumpun käynnistyksen aikana prosessinvalvontajärjestelmästä [PTK/2022-07-07 13:25]. Loviisan rajallisesta koosta johtuen jännitteen lasku saa maksimissaan olla $\Delta V/V_0 < 5$ %. Saksalaisilla esi-KONVOI- ja KONVOI-laitoksilla

on oletettu $\Delta V/V_0 \approx 15\%$:n $P_{svp} < 12$ MW:n pääsyöttövesipumppujen aiheuttama jännitehäviö. (Ziegler, 1985 s. 93)

Loviisan voimalaitoksen suurin kuluttaja (varamagnetointikone, $P_{vmk} \approx 4$ MW) ei kytkeydy automaattisesti ja siksi sitä ei tässä oteta huomioon. (LOV, 2022)



Kuva 16 Syöttövesipumppu kytkeminen 02:39 (LOKS2 APROS-mallista)



Kuva 17 Syöttövesipumppu 20RL22D001 kytkeminen (PTK – 2022-07-07 13:25)

Laskut on tehty simulaattorilla, joka käyttää termohydraulisiin ilmiöihin optimoitua Apros®-mallia. Lisäksi tämä simulaattori on koulutuksen työkalu, eikä analyttinen suunnittelutyökalu. Siksi tulokset ovat vain suuntaa-antavia. Jännitteen laskun kvantitatiivisiin analyyseihin on käytettävä joko sähköjärjestelmille optimoituja malleja tai testejä todellisissa sähköjärjestelmissä. Ilmiön yleistä, melko pinnallista arviointia varten tämän opinnäytetyön puitteissa tämä katsotaan riittäväksi jännitepudotuksen vertailuun kytkennän aikana. Simulaattorilla laskettu jännitteen pudotus on kuitenkin samaa suuruusluokkaa kuin laitoksella ($\Delta V_{LOKS} \approx 260 \text{ V}$ vastaan $\Delta V_{LO2,BB} \approx 342 \text{ V}$, $\Delta V_{LO2,BV} \approx 319 \text{ V}$) ja siten hyväksyttävä.

10. Henkilöstö

Tehokäytön henkilöstösuunnitteluun sisältyy yhden hätädieseljärjestelmän määräaikainen koeajo joka viikko, joka kestää tunnin. Ennakkohuollon koeajo kestää 10 tuntia. Tässä henkilöstösuunnittelua tulisi muuttaa vastaavasti, koska käyttömies on sidottu 10 kertaa pidempään eikä pysty suorittamaan päivittäisiä kierroksia ja muita normaalista toiminnasta johtuvia tehtäviä.

11. Varautuminen ongelmiin

Hätädieseljärjestelmän huoltokampanjan suunnittelu vaatii häiriötöntä tehokäyttöä ja turvallisuusjärjestelmien käyttökuntoisuutta. Onnettomuuksien ja häiriöiden

todennäköisyys on pieni mutta se ei ole nolla. Lisäksi hätätilanteet ovat stressaavia mikä heikentää ihmisen päätöksenteko- ja toimintakykyä.

Näiden syiden johdosta onnettomuuksiin ja häiriöihin tulee varautua kokonaisvaltaisella suunnitelmalla. Suunnittelun kannalta tärkeitä ovat huolto-ohjelma ja sen eteneminen, varajärjestelmien ja henkilöstön saatavuus.

Töiden suunnittelu ja käännepesteet

Dieseljärjestelmien 4×100 % rakenne tarjoaa hyvän varan, jos ennakkohuollossa olevan redundanssin lisäksi tulee yksittäinen vika toiseen redundanssiin. Tässä tapauksessa kriisinhallintaryhmän tulee arvioida esim. onko mahdollista keskeyttää huolto välittömästi vai voidaanko yksi diesel korvata muilla järjestelmillä (EY07, AHV tai toisen yksikön diesel). Ihannetapauksessa ennakkohuoltosuunnitelmiin määritettäisiin etukäteen piste, jolloin huolto-ohjelman vieminen loppuun on nopeampaa kuin keskeytys ja palauttaminen.

Tukiryhmään ja henkilöstöön liittyvät vaatimukset

Dieseljärjestelmän koeajo ei välttämättä tarvitse kokoaikaista valvontaa. Mikäli koeajon aikana sattuu, varsinkin 10 tunnin ajon aikana, käyttömiestä saatetaan tarvita muiden turvajärjestelmien tarkistamiseen. Siksi dieseljärjestelmä tulisi jättää tilaan, jossa se syöttää dieselkiskolle. Vaihto automaattiseen kuormitusohjelmaan alustetaan erottamalla normaalikäyttö ja dieselkisko.

Ohjeistoon liittyvät vaatimukset

Hätätilanteessa on tärkeätä että menettelyt on ohjeistettu etukäteen. Ohjeiston arviointi ja mahdollinen muutos on tässä suhteessa tarpeen, koska suuri jälkilämmön määrä tehokäytön aikana rajoittaa toiminta-ajan minimiin.

7 YHTEENVETO JA NÄKYMÄ

Tässä luvussa on tiivistetty opinnäytetyö, tulokset ja mahdollinen jatkokehitys Loviisan ydinvoimalaitoksen turvallisuuden lisäämiseksi.

Ydinreaktorissa syntyy fissiotuotteita, jotka ovat radioaktiivisia. Hajotessaan nämä radioaktiiviset tuotteet vapauttavat suuren määrän energiaa, ns. jälkilämpöä. Sydänvaurioiden estämiseksi tämä lämpö on poistettava. Lämmönpoistoon käytetään pääasiassa aktiivisia jäädytysjärjestelmiä.

Aktiiviset turvallisuusjärjestelmät ovat riippuvaisia sähköenergian saannista. Loviisan voimalaitoksella on sähkönjakelujärjestelmä, jossa on useita vaihtoehtoja sähkönsyötön varmistamiseksi. Yksi näistä on hätädieseljärjestelmä, jossa on neljä dieselgeneraattoria yksikköä kohden. Korkean käytettävyyden ja luotettavuuden varmistamiseksi näille hätädieseljärjestelmille tehdään useita ennaltaehkäiseviä huoltoja.

Turvallinen ydinvoimalaitos tarvitsee sähköenergiaa kaikissa käyttötiloissa, tehokäytöstä aina vuosittaiseen latausseinokkiin.

Sydänvaurion riski tehonkäyttö- ja seisokkitiloissa on lähes yhtä suuri. Lähes 50 % sydänvaurion riskistä aiheutuu seisokkivaiheista, vaikka niiden osuus on vain 10 % vuodesta. Siksi dieseljärjestelmän ennakkohuollon siirtäminen vuosihuollosta tehokäytön ajalle näyttää johdonmukaiselta. Loviisan voimalaitoksen Living-PRA tarjoaa mahdollisuuden laskea useita ”mitä jos”-skenaarioita. Tässä työssä esitetyt ennakkohuoltoversiot syötettiin PRA-malliin, josta saatiin tuloksena eri vaihtoehtojen vaikutukset sydänvauriotaajuuteen.

PRA-mallin tuloksien perusteella suurin parannus saadaan siirtämällä dieselmoottorin ja -generaattorin ennakkohuolto vuosihuollosta käynnin ajalle. 16 vuoden ennakkohuoltojen (keskiarvo kestoista) siirto vuosihuollosta käynninaikaiseksi parantaa sydänvaurion taajuutta 0,02 % - 0,12 %. Parannus sydänvauriotaajuuteen yksitällisen vuoden osalta vaihtelee välillä 0,08 % - 0,55 %. Myös dieselkiskon ennakkohuollon siirtäminen pienentää sydänvaurioiden taajuutta mutta vaikutus ei ole niin suuri.

Ydinvoiman ehdoton edellytys on lakien asettamien hallinnollisten puitteiden noudattaminen. On tärkeää ymmärtää sovellettavat lait, säännöt, määräykset ja standardit ja sisällyttää ne kaikkiin arviointeihin ja päätöksiin.

Lopuksi PRA-arvioinnin tulosten, kahden saksalaisen ydinvoimalaitoksen tapaustutkimuksen ja laatijan käyttökokemusten perusteella on laadittu suositukset

tarvittavista muutoksista ennakkohuoltomenettelyihin. Lisäksi on esitetty edellytykset muutokselle ja miten muutosta pitäisi arvioida ja sen riskeihin varautua.

Hätädieseljärjestelmä on Loviisan ydinvoimalaitokselle vain yksi monista turvallisuusjärjestelmästä. Voimalaitoksen alkuperäinen kunnossapidon suunnittelu tehtiin suurelta osin ilman useita skenaarioita helposti laskevaa PRA:ta. Tämän opinnäytetyön perusteella suositellaan myös muiden turvallisuusjärjestelmien ennakkohuoltojen arviointia vastaavalla menetelmällä. Arvioinneissa tulee huomioida ydinturvallisuuden lisäksi myös muita turvallisuuden osia kuten säteilysuojelu, työturvallisuus ja ympäristöturvallisuus.

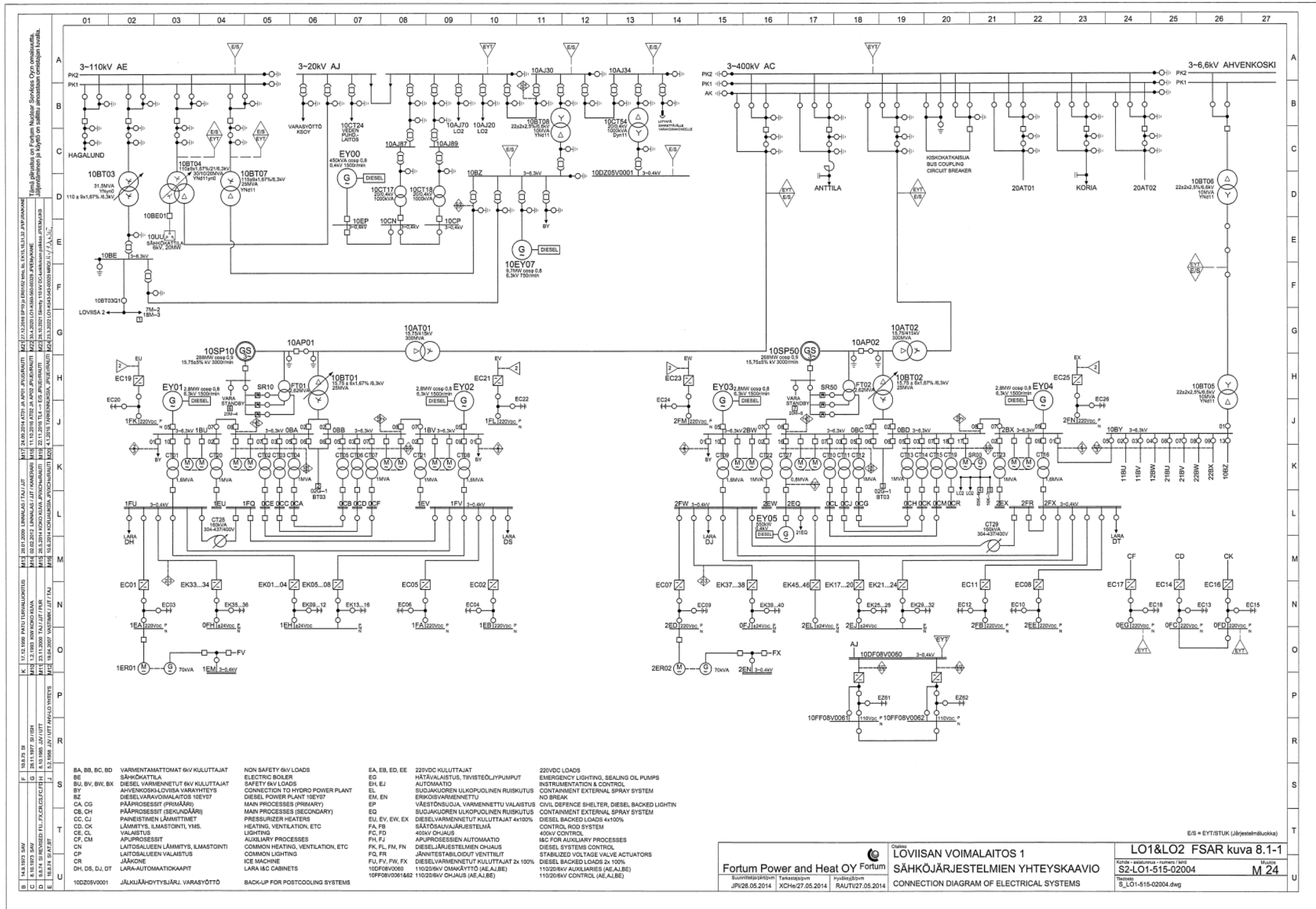
LÄHTEET

- Ahokas, Jarkko. 2021.** *FSAR 3.6 Järjestelmien toiminnalliset perusteet.* Versio 2.2 : Loviisan Voimalaitos, 2021. s. 9. Käyttö rajoitettu. Doris-Dokumentti: LO1-K852-00695.
- Ahokas, Jarkko ja Leino, Kaisu. 2020.** *FSAR 3.1 Laitoksen turvallisuuteen liittyvät suunnitteluvaatimukset.* Versio 3.1 : Loviisan voimalaitos, 2020. s. 29. Käyttö rajoitettu. Doris-Dokumentti: LO1-K852-00722.
- Eloranta, Kari. 2022.** *LO1, LO2 Loviisan todennäköisyyspohjaisen riskianalyysin (PRA) ylläpito ja soveltaminen.* Versio 10.0 : Loviisan Voimalaitos, 2022. s. 15. Käyttö rajoitettu. Doris-Dokumentti: MO-05-00019.
- Fortum. 2014.** *Loviisan Voimalaitos 1 Sähköjärjestelmien yhteyskaavio.* Versio M24 : Loviisan Voimalaitos, 2014. s. 1. Käyttö rajoitettu. Doris-Dokumentti: S_LO1-515-02004_001.
- Hörmann, H. J. 1994.** *FOR-DEC: a Prescriptive Model for Aeronautical Decision Making.* s.l. : Computer Science, 1994.
- Jänkälä, Kari; Sirén, Sami ja Virtanen, Timo. 2021a.** *LO1, LO2 Riskitutkimus, Pääraportin luku 14: Johtopäätökset.* Versio 9.0 : Loviisan voimalaitos, 2021a. s. 33. Käyttö rajoitettu (salainen). Doris-Dokumentti: LO1-T841914-00006.
- Kelavirta, Teemu. 2021.** *KZ-tunnusten määrittely, varaus ja tunnisteiden tilaaminen.* Versio 6.2 : Loviisan Voimalaitos, 2021. s. 8. Käyttö rajoitettu. Doris-Dokumentti: T-01-00015.
- KONV. 2022.** *KONVOI:n Dieselhuolto. Henkilöhaastattelu KONVOI.* Loviisa : Puhelimen kautta 2022-05-05, 2022.
- Kouts, Herbert. 1986.** *The Chernobyl Accident.* Upton : Brookhaven National Laboratory - BNL, 1986. s. 24. BNL--52033.
- KTA. 2017.** *KTA 3501: Reaktorschutzsystem und Überwachungseinrichtungen des Sicherheitssystems.* Salzgitter : Kerntechnischer Ausschuss (KTA), 2017. s. 30. KTA 3501.
- Laato, Taisto. 2021.** *Riskitutkimus, Pääraportin luku 11: Lähdetermilaskenta.* Versio 6.0 : Loviisan Voimalaitos, 2021. s. 51. Käyttö rajoitettu. Doris-Dokumentti: LO1-T841911-00002.
- Lamroth, H. 2006.** *FSAR 1.3 Loviisan rakennusprojekti ja suunnittelun vertailu eräisiin muihin VVER-ydinvoimalaitoksiin.* Versio 5.0 : Loviisan Voimalaitos, 2006. s. 13. Käyttö rajoitettu. Doris-Dokumentti: LO1-K852-00694.

- Lederer, Bernd-Jürgen ja Wildberg, Dieter W. 1992.** *Reaktorhandbuch: kerntechnische Grundlagen für Betriebspersonal von Kernkraftwerken*. 2. Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 1992. s. 334. ISBN: 3-446-16145-7.
- Leppäsalo, Niklas. 2021.** *FSAR 01.2 Laitoksen yleiskuvaus*. Versio 3.0 : Loviisan voimalaitos, 2021. s. 35 . Käyttö rajoitettu. Doris-Dokumentti: LO1-K852-00898.
- Lobner, P.;Donahoe, C. ja Cavallin, C. 1990.** USNRC. *Nuclear Power Plant System Sourcebook*. [Online] US Nuclear Regulatory Commission, 09 1990. [Viitattu: 21. 06 2022.] <https://www.nrc.gov/docs/ML0230/ML023040268.pdf>. NUREC/CR-5640 SAIC-89/1541.
- LOV. 2022.** Loviisan voimalaitos. *Henkilöhaastattelu*. Loviisa : 2022-03-01 - 2022-06-22, 2022.
- Malmberg, Patric. 2016.** *LO1, LO2 Häädieselgeneraattoreiden konetekninen huolto ja tarkastus*. Versio 7.0 : Loviisan Voimalaitos, 2016. s. 7. Käyttö rajoitettu. Doris-Dokumentti: Y-02-00017.
- Nevalainen, Urpo. 2022.** *LO1, LO2 6 kV ja 20 kV kytkinlaitosten tarkastusohje*. Versio 13.0 : Loviisan Voimalaitos, 2022. s. 12. Käyttö rajoitettu. Doris-Dokumentti: Y-03-00006.
- . **2015.** *LO1, LO2 Dieselgeneraattoreiden sähkökunnossapito*. Versio 5.1 : Loviisan Voimalaitos, 2015. s. 21. Käyttö rajoitettu. Doris-Dokumentti: Y-03-00025.
- Piensasalo, Jyri. 2022.** *FSAR 8.1 Sähköjärjestelmät - johdanto*. Versio 3.0 : Loviisan Voimalaitos, 2022. s. 12. Käyttö rajoitettu. Doris-Dokumentti: LO1-K852-00775.
- . **2021.** *FSAR 8.4 Varmennetut vaihtosähköjärjestelmät*. Versio 4.0 : Loviisan Voimalaitos, 2021. s. 106. Käyttö rajoitettu. Doris-Dokumentti: LO1-K852-00490.
- pKONV. 2022.** Pre-KONVOI Dieselhuolto. *Henkilöhaastattelu*. Loviisa : Puhelimen kautta 2022-04-21, 2022.
- Rasmussen, Norman C. 1975.** *Reactor Safety Study*. Washington D.C : Nuclear Regulatory Commission, 1975. s. 198. WASH-1400 (NUREG 75/014).
- Riekkinen, Markku. 2021.** *LO1, LO2 Kunnossapitokonsepti*. Versio 8.0 : Loviisan voimalaitos, 2021. s. 17. Käyttö rajoitettu. Doris-Dokumentti: MO-07-00005.
- Ronkainen, Tanja. 2021.** *LO1 TTKE - Johdanto*. Versio 2.28 : Loviisan voimalaitos, 2021. s. 706. Käyttö rajoitettu. Doris-Dokumentti: LO1-K857-00277.
- Rosenström, Miro. 2021.** *FSAR 8.4.1.1 Dieselgeneraattorien ohjausjärjestelmät (uudet)*. Versio 1.0 : Loviisan Voimalaitos, 2021. s. 44. Käyttö rajoitettu. LO1-K852-01208.

- RSK. 2011.** *Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan)*. Bonn : Reaktor-Sicherheitskommission (RSK), 2011. s. 116. RSK 437.
- Sandberg, Jorma;ym. 2004.** *5. Ydinturvallisuus*. Helsinki : Säteilyturvakeskus, 2004. ISBN: 951-712-500-3.
- Sirén, Sami;Jänkälä, Kari ja Koskenranta, Jukka. 2021.** *LO1, LO2 riskitutkimus, pääraportin luku 1: Johdanto*. Versio 9.0 : Loviisan voimalaitos, 2021. s. 23. Käyttö rajoitettu (salainen). Doris-Dokumentti: LO1-T84191-00006.
- SPERT I Reactor Safety Studies*. **Nyer, W. E. ja Forbes, S. G. 1958.** 65, 1958, Heat Transfer, Osa/vuosik. 12, s. 117.
- STUK. 2019.** *YVL B.2: Ydinlaitoksen järjestimen, rakenteiden ja laitteiden luokittelu*. Helsinki : Säteilyturvakeskus (STUK), 2019. s. 14+3. YVL B.2.
- USDOE. 2005-2013.** Manhattan Project: CP-1 Goes Critical, Met Lab, December 2, 1942. *Office of Scientific and Technical Information*. [Online] U.S. Department of Energy, 2005-2013. [Viitattu: 17. 06 2022.] https://www.osti.gov/opennet/manhattan-project-history/Events/1942-1944_pu/cp-1_critical.htm.
- USNRC. 1957.** *Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants*. Rockwell, MD : United States Atomic Energy Commission, 1957. WASH-740.
- VROM. 2008.** *Convention on Nuclear Safety*. The Hague : Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, 2008. s. 178.
- Ziegler, Albert. 1983.** *Lehrbuch der Reaktortechnik, Band 1 Reaktorteorie*. Berlin : Springer, 1983. s. 255. ISBN: 3540121986.
- **1985.** *Lehrbuch der Reaktortechnik, Band 3 Kernkraftwerkstechnik*. Berlin : Springer, 1985. s. 341. ISBN: 3540154736.

Liite 1 Sähköjärjestelmien yhteyskaavio



Liite 2 Loviisan voimalaitoksen KZ-vihko



Sisäiseen käyttöön / For internal use
Syyskuu / September 2019

KZ-vihko

Prosessien merkintäjärjestelmä

Loviisan voimalaitos
Loviisa Power Plant

Loviisan KZ-järjestelmä on kuvattu Doriksessa: T-01-00015

Pääryhmät, Main Groups

A - M, Z

Sähkö- ja automaatiotekniikka

- A Suurjännitekytkinlaitokset, -kiskotot ja -kojeet
High Voltage Switch Plants, Bus Bar Systems and Devices
- B 6kV kytkinlaitokset, -kiskotot ja kojeet
6 kV Switch Plants, Bus Bar Systems and Devices
- C 400V kytkinlaitokset, -kiskotot ja kojeet
400 V Switch Plants, Bus Bar Systems and Devices
- D Varmennetut keskusket, Switchgear with Backup Power Supply
- E Varmennetut keskusket ja niiden syöttölaitteet
Emergency Power Supply Equipment and Switchgear
- F Varmennetut keskusket ja alajakokeskusket
Switchgear and Distribution Boards with Emergency Power Supply Backup
- G Valvomot ja paikalliset ohjausamat
Control Rooms and Local Control Stations
- H Ohjaus-, merkinanto ja suojaustaulut ja -kaapit
Control, Signalling and Protection Boards and Cabinets
- J Mittaus- ja säätökaapit, Measurement and Control Cabinets
- K Jakokotelot ja -telineet, Distribution Panels and Racks
- L Ristiyhteyksitelineet, Cross Connection Racks
- M Viestilaitteet, Monitoring and Communication Equipment
- Z Suojausjärjestelmät, Protection Systems

Käyttöpaikkatunnuskilvet

(Musta = LO1, Punainen = LO2)

Equipment ID tags

(Black = LO1, Red = LO2)



4

Pääryhmät, Main Groups

N - Y

Prosessit ja konetekniikka

- P Polttoaineen käsittely, kuljetus ja varastointi
Fuel Handling, Transport and Storage
- R Vesi-höyrykierto
Steam - Water Systems
- S Turbiini ja generaattori
Turbine and Generator
- T Reaktorin apujärjestelmät
Reactor Auxiliary Systems
- U Konventionaaliset apujärjestelmät
Conventional Auxiliary Systems
- V Jäähdytysvesijärjestelmät
Cooling Water Systems
- X Reaktorin suojakuori sisälaitteineen, säteilyvalvonta
Reactor Containment and Internals, Radiation Monitoring
- Y Ydintekninen höyrynehtijärjestelmä
Nuclear Steam Supply Systems

Värimerkinnät, Color markings:

- Erittäin kontaminoitunut
Highly contaminated
- Mahdollisesti kontaminoitunut
Possibly contaminated
- Kontaminoitunut
Contaminated
- Ydinturvallisuudelle tärkeä
Nuclear safety importance

5

Merkintäkoodi

P Polttoaineen käsittely, kuljetus, varastointi

Fuel Handling, Transport and Storage

- PL Latauskone
Fuel Loading Machine K331
- PM Polttoainepin käsittelylaitteet
Fuel Handling Equipment K332
- PN Tuoreen polttoaineen varastointilaitteet
Fresh Fuel Storage Equipment K333
- PP Polttoainepin tarkastuslaitteet
Testing Equipment for Fuel Assemblies K334
- PQ Polttoainealtaan ja -varaston verho
Fuel Pool and Store Lining K218
- PR Polttoainealtaan ja -varaston apurakentet
Fuel Pool and Store Internals K335
- PT Polttoaineen kuljetusvälineet
Fuel Transport Systems K336
- PW Työkälut ja välineet
Tools and Devices K337

6

Merkintäkoodi

R Vesi-höyrykierto

Steam - Water Systems

- RA Tuorehöyryputkisto
Main Steam Line K382
- RB Välitilustus, vedenerotus
Reheating and Water Separation K383
- RC Turbiinin ohitus
Turbine By-Pass K384
- RD KP-esilämmitys
HP-Preheating System K372
- RE Päälaughteen puhdistus
Main Condensate Purification K376
- RF Syöttövesipumppujen tiivistysvesi
Sealing Water for Feedwater Pumps K373
- RH MP-esilämmitys
LP-Preheating System K371
- RL Syöttövesipiiri
Feedwater System K373
- RM Päälaughtepiiri
Main Condensate System K374
- RN Sivulauhde
Auxiliary Condensate System K375

7

Merkintäkoodi	Doris-tunnus
U Konventionaaliset apujärjestelmät Conventional Auxiliary Systems	
UA Täyssuojanpoistolaitos Deionization Plant	K441
UC Muut vedenkäsittelylaitokset (ei jäähdytysvesi) Other Water Treatment Plants	-
UG Kalliomekaaniset mittalaitteet Rock Mechanic Measurement Equipment	-
UH Kemikaalien syöttölaitteet Chemical Feeding Equipment	K442
UJ Laitos- ja palovesijärjestelmä Fire Water Supply	K444
UK Juomavesiverkko Drinking Water Supply	K443
UL Viemäröinti Sewerage	K445
UM Hydrasiinin ja ammoniakkin annostelu Hydrazine and Ammonia Supply System	K447
UP Dieselien polttoöljyjärjestelmä Diesel Fuel System	-
UQ Nosturit, hissit ja kuljetuslaitteet Cranes, Hoists, Lifts and Transport Equipment	K476

14

Merkintäkoodi	Doris-tunnus
U Konventionaaliset apujärjestelmät Conventional Auxiliary Systems	
UR Korjaamot, varastot ja laboratoriot Workshops, Stores, Laboratories	K471 K472
US Paineilmajärjestelmä Compressed Air Supply	K474
UT Muut kaasukeskukset Other Gas Centers	K475
UU Apukattilalaitos Auxiliary Boiler Plant	K473
UV Erikoisilmastointi Special Ventilation	K453- K455
UW Ilmastointi ja lämmitys Ventilation and Heating Systems	K456- K458
UX Palo- ja kaasusuojelulaitteet (ei UJ) Fire and Gas Protection Equipment	K478, K645
UY Käyttölaitteet (ovet, ikkunat jne.) Drives (Roll Gates, Windows etc.)	
UZ Koestuslaitteet (esim. varoventtiilien koestuslaite) Testing Equipment (for example Pilot-valves)	

15

Merkintäkoodi	Doris-tunnus
V Jäähdytysvesijärjestelmä Cooling Water Systems	
VA Meriveden puhdistus Circulating Sea Water Treatment (Mechanical)	K461
VC Merivesipiiri Circulating Sea Water System	K462
VE Lauhduttimien puhdistus Condenser Purification System	K463
VF Sivumerivesipiiri Service Sea Water System	K464
VG Turbiinivälijäähdytyspiiri Conventional Intermediate Cooling System	K465
VS RR-jäähdytystornit RR Cooling Tower	K469
VT TF-jäähdytystornit TF Cooling Tower	K469
VU Suojakuoren ulkopuolisen ruiskutusjärjestelmän jäähdytys Cooling of Containment External Sprinkler System	K468

16

Merkintäkoodi	Doris-tunnus
X Reaktorin suojakuorilisälaitteiden, säteilyvalvonta Reactor Containment and Internals, Radiation Monitoring	
XA Terässuojakuori Steel Containment	K216
XB Materiaalikanava Material Air Lock	K216
XC Henkilökanava Personnel Air Lock	K216
XD Hätätakanava Emergency Air Lock	K216
XE Asennusaukot Installation Openings	-
XF Putkiläpiviennit Pipe Penetrations	K419, K216
XG Sähköläpiviennit Cable Penetrations	K692
XH Apurakenteet Auxiliary Structures (Building)	K216
XJ Mittausputkiläpiviennit Impulse Line Penetrations	K419

17

Merkintäkoodi	Doris-tunnus
X Reaktorin suojakuorilisälaitteiden, säteilyvalvonta Reactor Containment and Internals, Radiation Monitoring	
XK Paineentasausventtiilit Vacuum Relief Valves	K423
XL Jäälauhdutin Ice Condenser System	K421
XM Jäälauhduttimien jäähdytys Ice Condenser Cooling System	K422
XN Ilmanpalauspuhaltimet Circulating Air Fans for Emergency Situation	K424 K428
XP Jään valmistus ja käsittelylaitteet Ice Manufacturing and Handling Equipment	K425
XQ Tilojen säteilyvalvonta Area Radiation Monitoring	K654
XR Henkilöstön säteilyvalvonta Personnel Radiation Monitoring	K656
XS Ympäristön säteilyvalvonta Environment Radiation Monitoring	K655
XT Ovet Doors	K421

18

Merkintäkoodi	Doris-tunnus
X Reaktorin suojakuorilisälaitteiden, säteilyvalvonta Reactor Containment and Internals, Radiation Monitoring	
XU Suojakuoren ulkopuolinen ruiskutusjärjestelmä External Sprinkler System for Containment	K427
XV Vedynpolttojärjestelmä Hydrogen Igniters and Recombiners	K416
XW Reaktorirakennuksen vetyvalvonta Reactor Building Hydrogen Control System	K419
XX Säähavaintojärjestelmä Meteorological Observation System	K657

19

Merkintäkoodi	Doris-tunnus
R Vesi-höyrykierro Steam - Water Systems	
RQ Omakäyttöhöyry Auxiliary Steam Supply	K386
RR Primääripiirin seisontajäähdytys Residual Heat Removal System	K385
RT Putkistojen vesitykset Piping Drains	K387
RU Omakäyttölauhde ja palautus Auxiliary Steam Condensate and Return System	K377
RV Laitoslisäveden syöttö Supply System of Deionated Water	K378
RY Höyrystimien ulospuhallus Steam Generator Blow-Down	K381

8

Merkintäkoodi	Doris-tunnus
S Turbiini ja generaattori Turbine and Generator	
SA Turbiini Turbine	K351
SB Turbiinin laakerit Turbine Bearings	K352
SC Voiteluöljyjärjestelmä Lubrication System	K353
SD Lauhduttimet ja ejektorit Condensing System and Ejectors	K354
SE Säättö ja suojaus Turbine Governor and Protection	K355
SF Ilmaukset Venting	-
SG Tiivistyshöyry ja ejektori Gland Steam System and Ejectors	K356
SH Turbiinin vesitykset Turbine Drain System	K357
SK Laitossäättö Plant Power Control	-
SO Turbiinin ja generaattorin yhteiset osat Common Parts for Turbine and Generator	K359

9

Merkintäkoodi	Doris-tunnus
S Turbiini ja generaattori Turbine and Generator	
SP Generaattori Generator	K361
SQ Generaattorin laakerit Generator Bearings	K362
SR Magnetointi Excitation System	K363
SS Staattorin vesijäähdytys Stator Water Cooling System	K364
ST Vetyjärjestelmä Hydrogen System	K365
SU Tiivistysöljyjärjestelmä Sealing Oil System	K366

10

Merkintäkoodi	Doris-tunnus
T Reaktorin apujärjestelmät Reactor Auxiliary Systems	
TB Kemikaalien syöttö Chemical Supply	K414
TC Primääriveden puhdistus Reactor Coolant Purification System	K343
TD Boorivesien käsittelylaitos Boron Water Treatment	K434
TE Primääripiirin poistovesien esipuhdistus Pre-purification of Reactor Coolant Drainage	K413
TF Reaktorivälijäähdytyspiiri Nuclear Intermediate Cooling System	K466
TG Polttoainelaiteiden jäähdytys Fuel Pool Cooling	K467
TH Hätäjäähdytysjärjestelmä Low Pressure Safety Injection	K341
TJ Hätälisävesijärjestelmä High Pressure Safety Injection	K342
TK Normaali lisävesijärjestelmä ja vuotojenkeruu Normal Make-up and Drains Collection System	K411
TL Valvottujen alueiden ilmastointi Controlled Zone Ventilation Systems	K451- K452

11

Merkintäkoodi	Doris-tunnus
T Reaktorin apujärjestelmät Reactor Auxiliary Systems	
TM Allasvesien käsittely Fuel Pool Water Treatment	K432
TN Apujärjestelmät (neste, höyry) Auxiliary Supply Systems (Liquid, Steam)	K417
TP Apujärjestelmät (typpi, kaasu, ilma) Auxiliary Supply Systems (Nitrogen, Gas, Air)	K415 K418 K628
TQ Sprinklerjärjestelmä Containment Sprinkler System	K426
TR Viemäri-vesien puhdistus Sewage Water Treatment Plant	K433
TS Aktiivisten poistokaasujen käsittely Radioactive Gaseous Waste Treatment	K437
TT Kiinteytyslaitos Solidification Plant	K431
TU Laitoksen ja laitteiden dekontaminointi Plant and Equipment Decontamination	K436
TV Näytteenottojärjestelmä Sampling System	K416

12

Merkintäkoodi	Doris-tunnus
T Reaktorin apujärjestelmät Reactor Auxiliary Systems	
TW Nestemäisten jätteiden varasto Liquid Active Waste Storage	K435
TY Vesitykset ja ilmaukset Drain System and Venting	K412
TZ Erikoisviemärinti Special Sewerage	K438

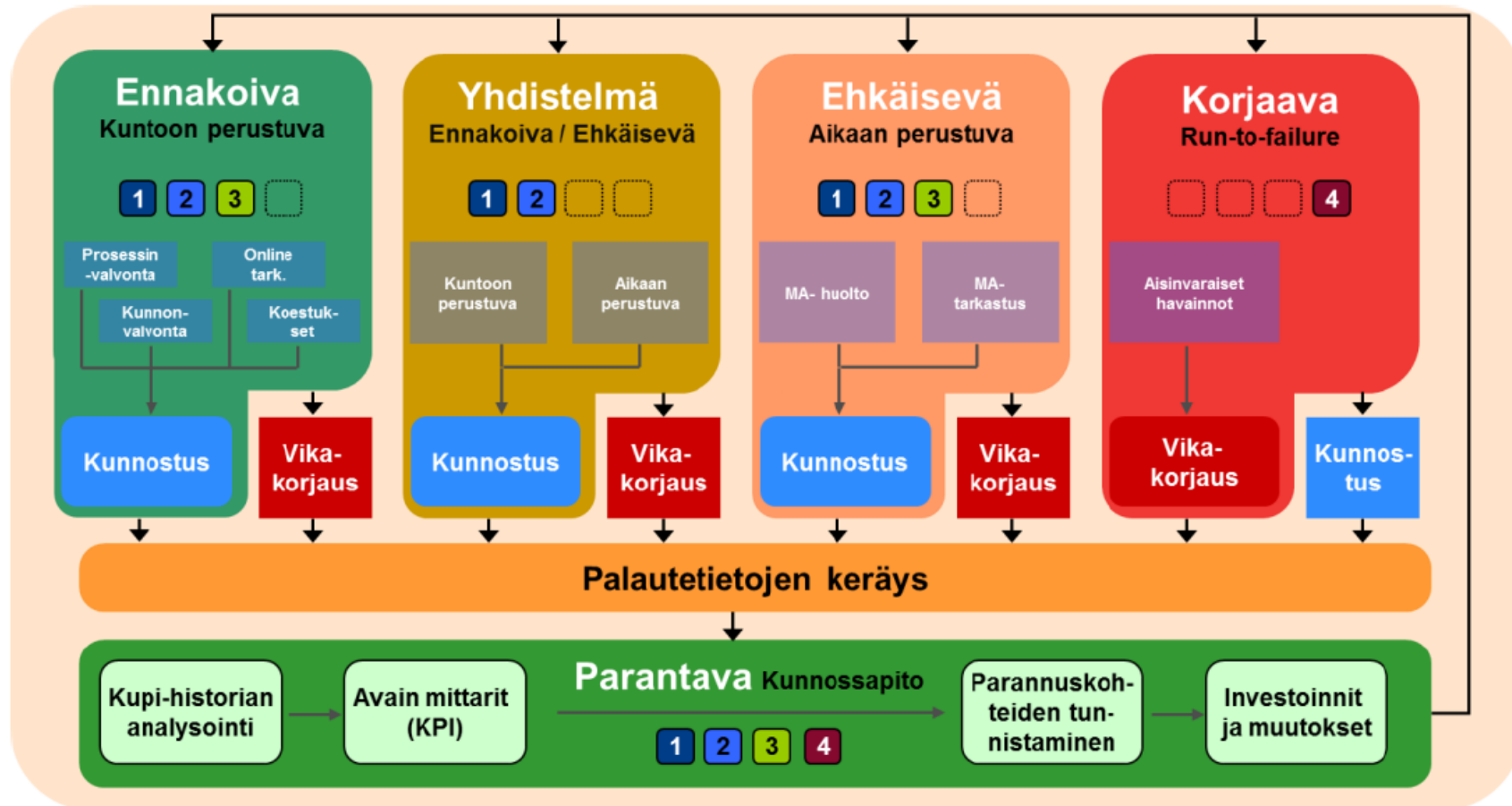
13

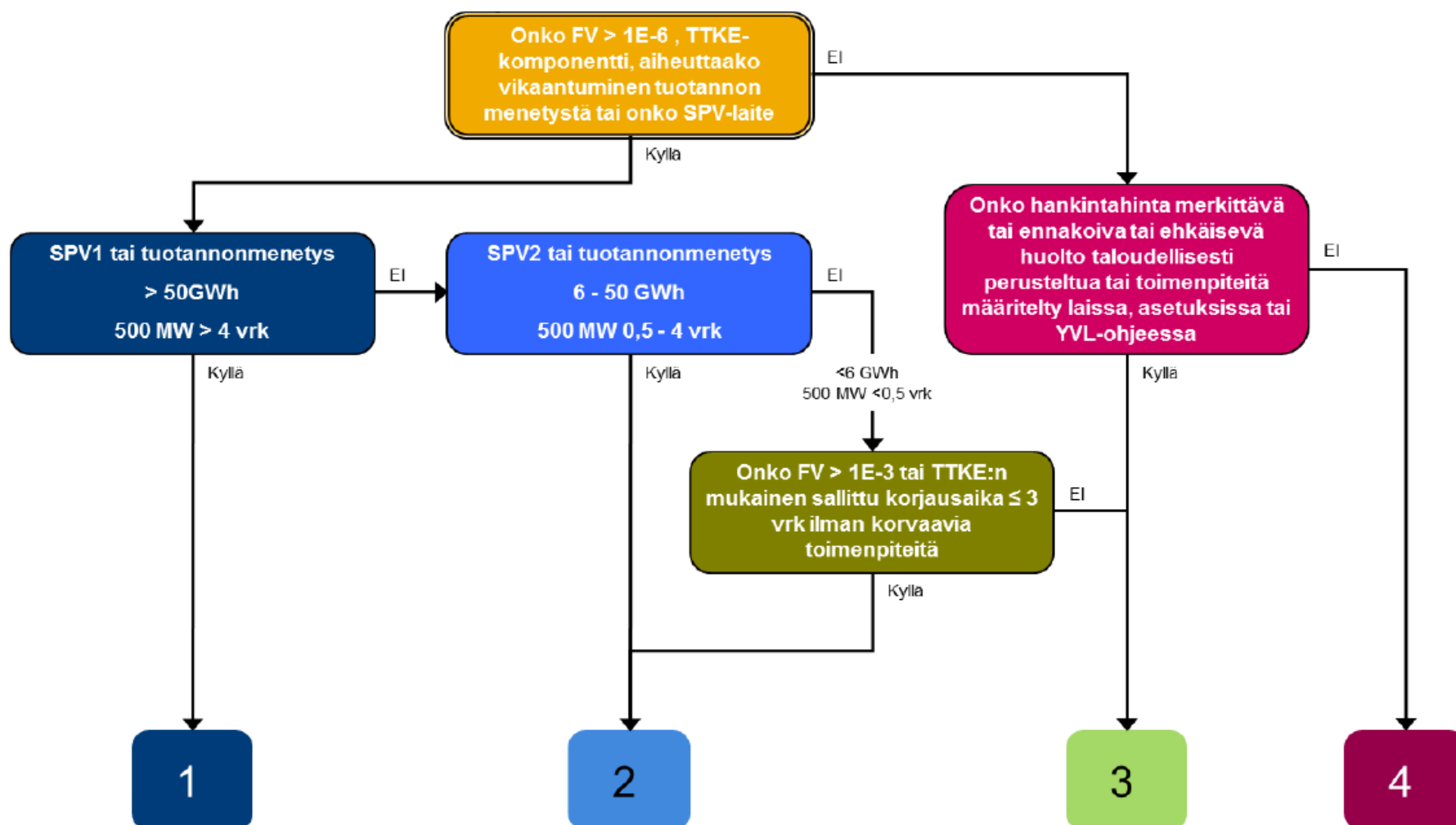


Vihkoon liittyvät palautteet voi lähettää osoitteeseen viestinta.loviisa@fortum.com



Liite 3 Kunnossapidonkonseptikaaviot (Riekkinen, 2021 ss. 6, 10)





Liite 5 Yksityiskohtaiset tulokset

Liitetaulukko 1 Toteutunut ajat siirto revisiosta tehoaikaan

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
KON	Ohjelma	1	2	1	4	1	2	1	8	1	2	1	4	1	2	1	16
	kesto /h	59	58	59	72	59	58	59	113	59	58	59	72	59	58	59	113
GEN	Ohjelma	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1	4
	kesto /h	116	116	116	74	116	116	116	74	116	116	116	74	116	116	116	74
	maksimikesto /h	116	116	116	74	116	116	116	113	116	116	116	74	116	116	116	113
	parannus /%	-0,03282	-0,03282	-0,03282	-0,02094	-0,03282	-0,03282	-0,03282	-0,03197	-0,03282	-0,03282	-0,03282	-0,02094	-0,03282	-0,03282	-0,03282	-0,03197
	keskiarvo (16 v)	<u>110,375</u>															
	valittu arvo	111															
	parannus /%	-0,03140															

KIS	Ohjelma	0	2	0	4	0	2	0	8	0	2	0	4	0	2	0	8
	kesto /h	0	0	0	67	0	0	0	0	0	0	0	67	0	0	0	0
	parannus /%	0,00000	0,00000	0,00000	-0,11971	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	-0,11971	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	keskiarvo (16 v)	<u>8,375</u>															
	valittu arvo	9															
	parannus /%	-0,01608															

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Keski-arvo
Vaihtoehto 1	-0,03282	0,00000	-0,03282	0,00000	-0,03282	0,00000	-0,03282	0,00000	-0,03282	0,00000	-0,03282	0,00000	-0,03282	0,00000	-0,03282	0,00000	-0,0164
Vaihtoehto 2	-0,03282	-0,03282	-0,03282	-0,14065	-0,03282	-0,03282	-0,03282	-0,03197	-0,03282	-0,03282	-0,03282	-0,14065	-0,03282	-0,03282	-0,03282	-0,03197	-0,0462
Vaihtoehto 3	-0,03282	-0,03282	-0,03282	-0,02094	-0,03282	-0,03282	-0,03282	-0,03197	-0,03282	-0,03282	-0,03282	-0,02094	-0,03282	-0,03282	-0,03282	-0,03197	-0,0312
Vaihtoehto 4	0,00000	0,00000	0,00000	-0,11971	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	-0,11971	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	-0,0150

Liitetaulukko 2 Toteutunut ajat siirto revisiosta suunniteltu aikaan tehoikaan

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
KON	Ohjelma	1	2	1	4	1	2	1	8	1	2	1	4	1	2	1	16
	kesto /h (tot)	59	58	59	72	59	58	59	113	59	58	59	72	59	58	59	113
	kesto /h (suu)	12	36	12	60	12	36	12	108	12	36	12	60	12	36	12	108
GEN	Ohjelma	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1	4
	kesto /h (tot)	116	116	116	74	116	116	116	74	116	116	116	74	116	116	116	74
	kesto /h (suu)	36	36	36	60	36	36	36	60	36	36	36	60	36	36	36	60
	maksimikesto (tot) /h	116	116	116	74	116	116	116	113	116	116	116	74	116	116	116	113
	maksimikesto (suu) /h	36	36	36	60	36	36	36	108	36	36	36	60	36	36	36	108
	parannus /%	-0,05329	-0,05329	-0,05329	-0,02452	-0,05329	-0,05329	-0,05329	-0,03325	-0,05329	-0,05329	-0,05329	-0,02452	-0,05329	-0,05329	-0,05329	-0,03325
	keskiarvo (tot, 16 v)	110,4															
	keskiarvo (suu, 16 v)	48,0															
	valittu arvo (tot)	111															
	valittu arvo (suu)	48															
	parannus (ka.) /%	-0,04753															

KIS	Ohjelma	0	2	0	4	0	2	0	8	0	2	0	4	0	2	0	8
	kesto (tot) /h	0	0	0	67	0	0	0	0	0	0	0	67	0	0	0	0
	kesto (suu) /h	0	0	0	36	0	0	0	0	0	0	0	36	0	0	0	0
	parannus /%	0,00000	0,00000	0,00000	-0,52814	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	-0,52814	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	keskiarvo (tot, 16 v)	8,4															
	keskiarvo (suu, 16 v)	4,5															
	valittu arvo (tot)	9															
	valittu arvo (suu)	5															
	parannus /%	-0,06878															

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Keski- arvo
Vaihtoehto 1	-0,05329	0,00000	-0,05329	0,00000	-0,05329	0,00000	-0,05329	0,00000	-0,05329	0,00000	-0,05329	0,00000	-0,05329	0,00000	-0,05329	0,00000	-0,0266
Vaihtoehto 2	-0,05329	-0,05329	-0,05329	-0,55266	-0,05329	-0,05329	-0,05329	-0,03325	-0,05329	-0,05329	-0,05329	-0,55266	-0,05329	-0,05329	-0,05329	-0,03325	-0,1132
Vaihtoehto 3	-0,05329	-0,05329	-0,05329	-0,02452	-0,05329	-0,05329	-0,05329	-0,03325	-0,05329	-0,05329	-0,05329	-0,02452	-0,05329	-0,05329	-0,05329	-0,03325	-0,0472
Vaihtoehto 4	0,00000	0,00000	0,00000	-0,52814	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	-0,52814	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	-0,0660

Liitetaulukko 3 Suunniteltu ajat siirto revisiosta tehoaikaan

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
KON	Ohjelma	1	2	1	4	1	2	1	8	1	2	1	4	1	2	1	16
	kesto /h	12	36	12	60	12	36	12	108	12	36	12	60	12	36	12	108
GEN	Ohjelma	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1	4
	kesto /h	36	36	36	60	36	36	36	60	36	36	36	60	36	36	36	60
	maksimikesto /h	36	36	36	60	36	36	36	108	36	36	36	60	36	36	36	108
	parannus /%	-0,01018	-0,01018	-0,01018	-0,01697	-0,01018	-0,01018	-0,01018	-0,03055	-0,01018	-0,01018	-0,01018	-0,01697	-0,01018	-0,01018	-0,01018	-0,03055
keskiarvo (16 v)		<u>48</u>															
valittu arvo		48															
parannus /%		-0,01358															

KIS	Ohjelma	0	2	0	4	0	2	0	8	0	2	0	4	0	2	0	8
	kesto /h	0	0	0	36	0	0	0	0	0	0	0	36	0	0	0	0
	parannus /%	0,00000	0,00000	0,00000	-0,06432	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	-0,06432	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
keskiarvo (16 v)		<u>4,5</u>															
valittu arvo		5															
parannus /%		-0,00893															

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Keski-arvo
Vaihtoehto 1	-0,01018	0,00000	-0,01018	0,00000	-0,01018	0,00000	-0,01018	0,00000	-0,01018	0,00000	-0,01018	0,00000	-0,01018	0,00000	-0,01018	0,00000	-0,0051
Vaihtoehto 2	-0,01018	-0,01018	-0,01018	-0,08130	-0,01018	-0,01018	-0,01018	-0,03055	-0,01018	-0,01018	-0,01018	-0,08130	-0,01018	-0,01018	-0,01018	-0,03055	-0,0216
Vaihtoehto 3	-0,01018	-0,01018	-0,01018	-0,01697	-0,01018	-0,01018	-0,01018	-0,03055	-0,01018	-0,01018	-0,01018	-0,01697	-0,01018	-0,01018	-0,01018	-0,03055	-0,0136
Vaihtoehto 4	0,00000	0,00000	0,00000	-0,06432	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	-0,06432	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	-0,0080