HÖYRYSTIMIEN LÄMMÖNSIIRTOPUTKIEN VAURIOMEKANISMIEN RISKI-KARTOITUS

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan diplomityö

2024

Joona Palviainen

Tarkastajat: Professori Timo Björk

DI Ari Kuuslaakso

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Konetekniikka

Joona Palviainen

Höyrystimien lämmönsiirtoputkien vauriomekanismien riskikartoitus

Konetekniikan diplomityö

2024

54 sivua, 17 kuvaa ja 3 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Timo Björk ja DI Ari Kuuslaakso

Avainsanat: höyrystin, lämmönsiirtoputket, vauriomekanismit

Tämä diplomityö tarkastelee Olkiluoto 3 -ydinvoimalaitoksen höyrystimien lämmönsiirtoputkien mahdollisia vauriomekanismeja. Lämmönsiirtoputket toimivat painerajana primääri- ja sekundääripiirin välillä, joten niiden vikaantuminen voi vaikuttaa laitoksen turvallisuuteen. Opinnäytetyö on tehty Teollisuuden Voima Oyj:lle.

Työssä on analysoitu keskeisiä vauriomekanismeja, kuten jännityskorroosiota, mekaanista kulumista, väsymistä ja kemiallista syöpymistä. Lisäksi on tutkittu, miten erilaiset kuormitukset ja ympäristöolosuhteet, kuten korkea lämpötila, paine ja säteily, vaikuttavat näiden vaurioiden syntyyn. Työssä on tarkasteltu myös erilaisia tarkastusmenetelmiä ja niiden kykyä havaita erityyppisiä vaurioita.

Työn tavoitteena oli selvittää, mitkä vauriomekanismit ovat mahdollisia kyseisissä komponenteissa ja mitkä putket tai niiden osat ovat erityisen alttiita vikaantumiselle. Työssä vaurioiden ennakoitavuutta arvioitiin kehittäen samalla tarkastustietokantaa, joka voi toimia ohjaavana työkaluna tulevia huoltoja varten.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Joona Palviainen

Risk survey of failure mechanisms in steam generator heat exchanger tubes

Master's thesis

2024

54 pages, 17 figures and 3 tables

Examiners: Professor Timo Björk and M.Sc. (Tech.) Ari Kuuslaakso

Keywords: steam generator, heat transfer tubes, failure mechanisms

This thesis studies the possible failure mechanisms of the heat transfer tubes of the Olkiluoto 3 nuclear power plant's steam generators. The heat transfer tubes act as a pressure boundary between the primary and secondary circuits, so their failure can affect the safety of the plant. The thesis was written for Teollisuuden Voima Oyj.

The main failure mechanisms, such as stress corrosion, mechanical wear, fatigue cracking and chemical corrosion, have been analysed. In addition, the influence of different loads and environmental conditions, such as high temperature, pressure and radiation, on the development of these damages has been investigated. The work has also looked at different inspection methods and their ability to detect different types of damage.

The aim of the work was to identify the possible failure mechanisms of the components concerned and to identify which tubes or their parts are particularly susceptible to failure. In addition, the predictability of damage was assessed, while developing an inspection database that can serve as a guiding tool for future maintenance.

KIITOKSET

Lämpimät kiitokseni työnantajalleni Teollisuuden Voima Oyj:lle, joka tarjosi tämän mielenkiintoisen aiheen ja mahdollisti opinnäytetyön tekemisen. Kiitos myös opettavaisista ja opintoja tukevista kesäharjoitteluista. Vuosihuolloissa ehti nähdä ja kokea paljon.

Erityiskiitokset kuuluvat työnohjaajilleni Arille ja Timolle, joiden asiantunteva ohjaus ja tuki saivat työn viimeistellyksi. Kiitos myös kaikille työkavereilleni, jotka antoivat panoksensa tähän projektiin ja loivat kannustavan työilmapiirin.

Lisäksi haluan kiittää lämpimästi kaikkia opiskeluvuosieni aikana mukana olleita. Koneenrakennuskilta ry on ollut merkittävä yhteisö, jonka vertaistuki ja yhteenkuuluvuuden tunne ovat tehneet opiskelusta paljon mukavampaa. Erityiskiitokset myös kaikille Saunapaku-projektissa mukana olleille. Näistä riittää tarinaa kerrottavaksi työpaikan kahvipöytään pidemmäksikin aikaa.

Eurajoella, 18.11.2024

Joona Palviainen

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

D	Halkaisija	mm
t	Ainevahvuus	mm

Kreikkalaiset

Δp	Paine-ero	bar, Pa
σ_h	Kehäjännitys	Pa

Lyhenteet

ANN	Neuroverkko (Artificial Neural Networks)
ASME	American Society of Mechanical Engineers
AVB	Tärinänvaimennustanko (Anti-Vibration Bar)
EPRI	Electric Power Research Institute
ET	Pyörrevirta (Eddy Current Testing)
FDB	Virtauksen jakaantumislevy (Flow Distribution Baffle)
FIV	Virtauksen aiheuttamia värähtely (Flow Induced Vibrations)
FME	Irto-osa (Foreign Material Exclusion)
High-AVT	Korkean lämpötilan haihtuvien aineiden käsittely (High All-Volatile-Treatment)
I-690TT	Lämpökäsitelty Inconel 690 (Thermally Treated Inconel 690)
IASCC	Säteilyn kiihdyttämää jännityskorroosio (Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking)

IGA	Raerajakorroosio (Intergranular Attack)
IGC	Raerajakorroosio (Intergranular Corrosion)
IGSCC	Rakeiden välinen jännityskorroosio (Intergranular Stress Corrosion Cracking)
ISI	Käytönaikainen tarkastus (In-Service Inspection)
LPSCC	Matalan potentiaalin jännityskorroosio (Low Potential Stress Corrosion Cracking)
NDT	Ainetta rikkomaton testaus (Non-Destructive Testing)
ODSCC	Ulkohalkaisijan jännityskorroosio (Outside diameter Stress Corrosion Cracking)
OL3	Olkiluoto 3
PAMS	Putkistojen ja komponenttien analysointi- ja seurantajärjestelmä (The Piping and Component Analysis and Monitoring System)
PDCA	Jatkuvan parantamisen malli (Plan-Do-Check-Act)
PWR	Painevesireaktori (Pressurized Water Reactor)
PWSCC	Primääriveden jännityskorroosio (Primary Water Stress Corrosion Cracking)
RPC	Pyörrevirtaluotain, tyyppi (Rotating Pancake Coil)
PSI	Käyttöä edeltävä tarkastus (Pre-Service Inspection)
SG	Höyrystin (Steam Generator)
SCC	Jännityskorroosio (Stress Corrosion Cracking)
STUK	Säteilyturvakeskus
TGSCC	Rakeiden läpi kulkeva jännityskorroosio (Transgranular Stress Corrosion Cracking)
TIG	Volframi-inertti kaasuhitsaus (Tungsten Inert Gas Welding)
TSP	Putkitukilevy (Tube Support Plate)
TVO	Teollisuuden Voima Oyj

YVL Ydinturvallisuusohjeet

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto 10
1.1 Tavoitteet ja rajaus 10
1.2 Tutkimuksen toteutus 11
2 Höyrystin 12
2.1 Geometria 13
2.2 Valmistus 16
2.3 Materiaalit 19
2.4 Olosuhteet 21
2.4.1 Kuormitukset 22
2.4.2 Vesikemia 24
3 Vauriomekanismit 27
3.1 Mekaaninen kuluminen 27
3.1.1 Lommoutuminen 27
3.1.2 Kuluminen 28
3.1.3 Säteilyn aiheuttama turpoaminen 29
3.1.4 Väsyminen 29
3.2 Kemiallinen syöpyminen 30
3.2.1 Jännityskorroosio 30
3.2.1 Korroosioväsyminen 32
3.2.2 Piste- ja rakokorroosio 32
3.2.3 Eroosiokorroosio 33
3.2.4 Kitkakorroosio 34
4 Vauriomekanismien havaitseminen 35
4.1 Tarkastusmenetelmät 35
4.1.1 Pyörrevirtatarkastukset 36

4.1.2 Visuaalinen tarkastus 37
4.1.3 Painekoe 38
4.2 Korjausmenetelmät 38
5 Vauriomekanismien esiintyvyys 40
6 Tarkastustulosten ja aineiston hallinta 43
7 Johtopäätökset 48
Lähteet 51

1 Johdanto

Ydinvoimalla tuotetaan noin kolmannes Suomen sähköstä. Jotta tuotanto pysyy tasaisena ja turvallisena, on laitosten kuntoa valvottava tarkasti. Höyrystimet ovat voimalaitosten kriittisimpiä komponentteja, joiden toimintavarmuus vaikuttaa suoraan voimalaitoksen turvallisuuteen, tehoon ja käytettävyyteen. Tässä diplomityössä tutustutaan yleisesti ydinvoimaloiden höyrystimissä vaikuttaviin vauriomekanismeihin, jotka voivat vaarantaa laitoksen toiminnan. Tämä diplomityö on tehty Teollisuuden Voima Oyj:n Olkiluoto 3 ydinvoimalaitokselle. Työssä tutkitaan höyrystintä ja erityisesti sen lämmönsiirtoputkia.

1.1 Tavoitteet ja rajaus

Työn tavoitteena on muodostaa Olkiluoto 3 höyrystimien lämmönsiirtoputkien riskianalyysi. Riskianalyysissä otetaan huomioon mahdolliset vikaantumismekanismit ja niihin vaikuttavat kuormitukset. Työn tavoitteesta muodostuvat seuraavat tutkimuskysymykset:

- Millaiset vauriomekanismit ovat potentiaalisia ko. komponenteissa?
- Ovatko jotkin putket tai tietyt kohdat alttiimpia vikaantumiselle?
- Miten vikaantumisia tai niiden todennäköisyyksiä voisi ennustaa tai arvioida?
- Miten tarkastusohjelmaa voisi kehittää työssä saatujen tulosten avulla?

Tuloksien pohjalta on tarkoitus muodostaa putkikartat, joissa on korostettuna ne putket joihin tarkastuksia kannattaa keskittää. Höyrystimiä on neljä ja jokaisessa on 5980 lämmönsiirtoputkea. Jokaisen putken tarkastaminen yksittäin olisi erittäin aikaa vievää, joten putkikarttojen avulla pyritään optimoimaan tarkastustoimenpiteet ja kohdistamaan ne tehokkaasti.

1.2 Tutkimuksen toteutus

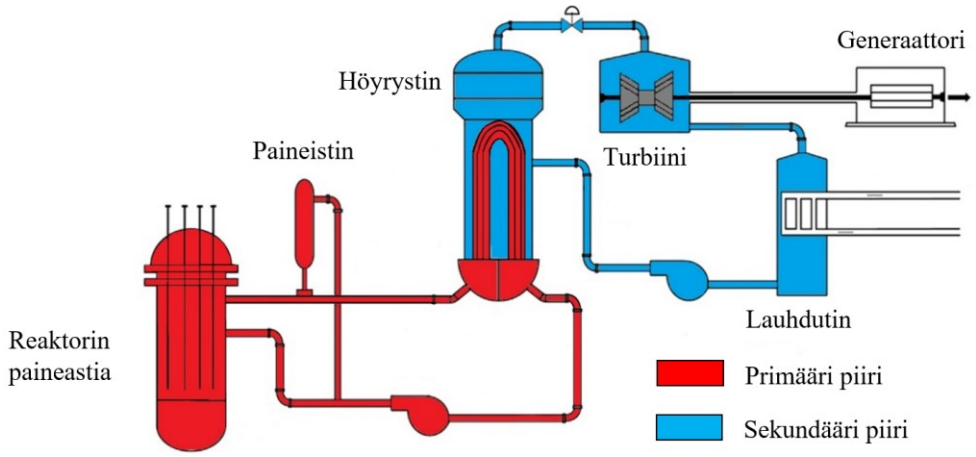
Tutkimus toteutetaan pääosin kirjallisuuskatsauksena, jossa lähteinä hyödynnetään tieteellisiä julkaisuja, kirjoja sekä Teollisuuden Voima Oyj:n sisäisiä dokumentteja. Sisäisistä dokumenteista saadaan muun muassa laitevalmistajan suunnitelmia laitoksen rakentamisajalta sekä eri tarkastusyhtiöiden pätevöinti- ja tarkastustuloksia. Tieteellisistä julkaisuista selvitetään, mitä vauriomekanismeja muilla laitoksilla on ilmennyt, ja mitkä ovat olleet niiden taustatekijät. Yhtenä tutkimusmenetelmänä käytetään myös haastatteluja eri sidosryhmien kuten kemian ja voimalaitostekniikan asiantuntijoiden kanssa.

Tutkimuksen tulosten perusteella pyritään kehittämään tarkastustietokanta, joka sisältää yksilöidyt tiedot kaikista tehdyistä tarkastuksista ja havaituista vaurioista. Tämä tietokanta toimii pohjana putkikarttojen luomiselle, ja sen avulla voidaan seurata putkien kuntoa järjestelmällisesti. Tietokannan avulla on myös mahdollista visualisoida vikaantumismekanismit ja niiden esiintymispaikat, mikä helpottaa tulevien tarkastusten suunnittelua ja kohdistamista. Kokonaisuuden hallinnalla tavoitellaan riskiohjautuvaa tarkastusten kohdennusta.

2 Höyrystin

Olkiluoto 3 (OL3) on Eurajoella sijaitseva ydinvoimalaitos, jonka Teollisuuden Voima Oyj (TVO) omistaa. Kyseessä on painevesireaktori (PWR) -laitos, jonka nettosähköteho on noin 1 600 MW. OL3 hyödyntää ydinfission energiaa sähkön tuottamiseen tehokkaan prosessin avulla. (TVO 2010, s. 3–4.)

Reaktorin ytimessä uraanipolttoainesauvat käyvät läpi hallittuja fissioreaktioita, jolloin syntyy huomattava määrä lämpöä. Painevesireaktorissa käytetään kahta erillistä piiriä. Primääripiirissä kiertävä vesi jäähdyttää reaktoria, josta kuumentunut jäähdytysvesi johdetaan höyrystimiin. Primääripiirissä paine pidetään niin korkeana, että vesi pysyy nestemäisenä eikä kiehu. Höyrystin toimii lämmönvaihtimena, jossa lämpö siirtyy primääripiirin vedestä sekundääripiirin veteen ilman, että vedet ovat suorassa kosketuksessa toisiinsa. Kuvassa 1 on esitetty yksinkertaistettuna laitoksen rakenne. (TVO 2010, s. 13–25.)



Kuva 1. Yksinkertaistettu rakenne PWR laitoksesta (mukaillen El-Sefy & Ezzeldin & El-Dakhakhni & Wiebe 2019, s. 1542).

Höyrystimissä kuuma paineistettu vesi muuttuu höyryksi. Kylläinen höyry johdetaan ensin korkeapaineturbiinille, jossa sen energia muunnetaan mekaaniseksi työksi. Tämän jälkeen

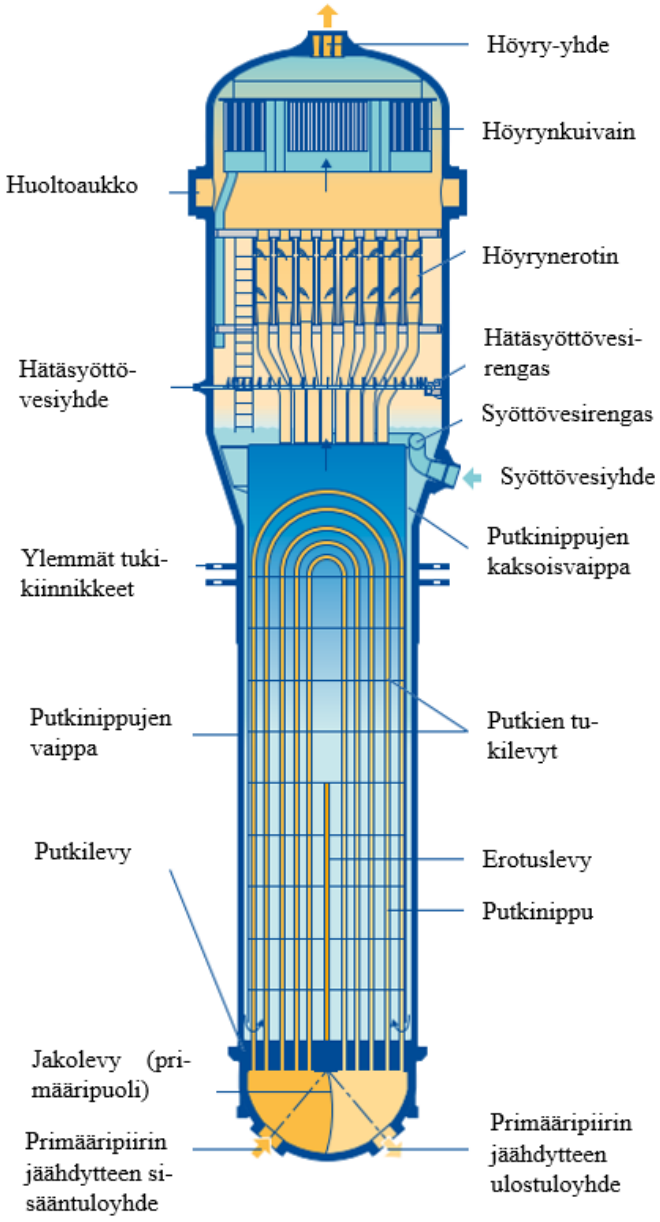
höyry kulkee välitulistimien läpi, joissa sen lämpötilaa nostetaan uudelleen. Lopuksi höyry ohjataan matalapaineturbiineille. Turbiinit on liitetty akselin kautta generaattoriin, joka muuntaa niiden mekaanisen energian sähköksi. (TVO 2010, s. 32–33.)

2.1 Geometria

Primääripiirin vesi tulee höyrystimelle sisääntuloyhteen eli kuumanyhteen kautta ja kiertää höyrystimen läpi U-muotoisten lämmönsiirtoputkien kautta poistuen kylmästä ulostuloyhteestä. Höyrystimen vaippa- eli sekundääripuolelle lisätään syöttövesiputkiston kautta vettä korvaten turbiiniin johdetun höyryn määrää. Syöttövesi höyrystyy ja kulkeutuu höyrystimen yläosaan, missä höyrynerotin ja kuivaaja erottavat jäljelle jääneen veden höyrystä. Erotettu vesi ohjautuu vaipan seinämiä pitkin takaisin alaosaan, jossa se palaa takaisin kiertoon. (TVO 2010, s. 25.)

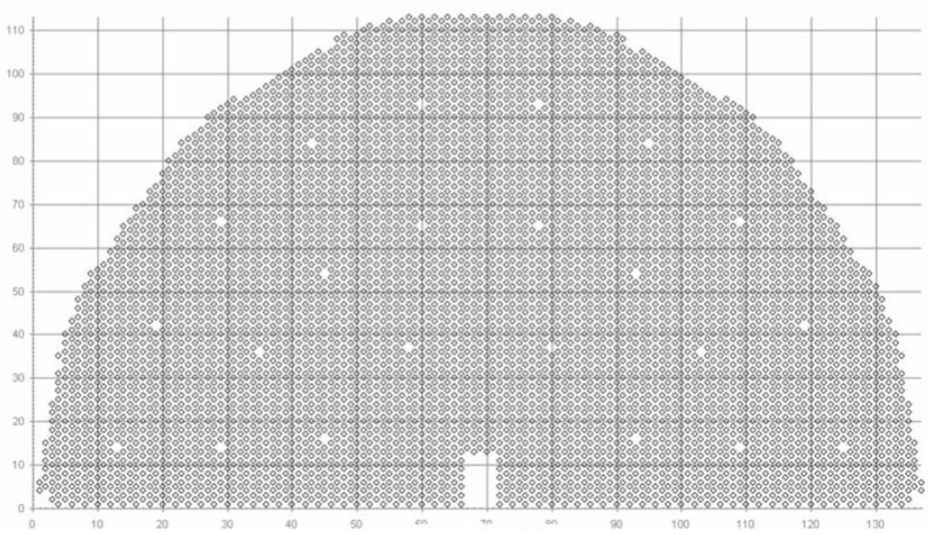
Höyrystimiä on olemassa myös muun mallisia. Olkiluoto 3 käytössä oleva vertikaalinen, U-muotoisilla putkilla varustettu höyrystin on yleisin, koska se tarjoaa hyvän lämmönsiirtotehon kompaktissa tilassa. Höyrystimiä voi olla myös horisontaalisessa asennossa sekä suorilla putkilla varustettuna. Höyrystin koostuu monista eri osista kuten kuvasta 2 nähdään. Tässä työssä keskitytään ainoastaan lämmönsiirtoputkiin ja niihin vaikuttaviin osiin. (Riznic 2017, s. 16–26.)

Lämmönsiirtoputket muodostavat putkinipun, jonka tehtävänä on siirtää riittävästi lämpöä toimiakseen annetuilla parametreilla 60 vuoden käyttöiän ajan ja säilyttää samalla rakenteellinen eheys. Putkimateriaalin valinta, putkien mitat, putkipaketin kokoonpano, putkituennan suunnittelu ja putken ja putkilevyn liitoksen suunnittelu vaikuttavat kaikki näihin kriteereihin. (Depoortere 2010, s. 19.)



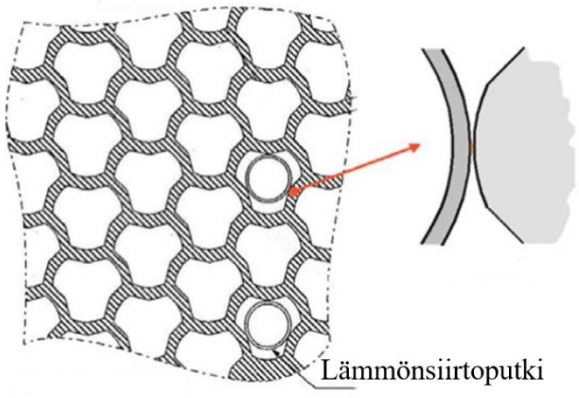
Kuva 2. Olkiluoto 3 höyrystimen rakenne (TVO 2010, s. 24).

Höyrystimen lämmönsiirtoputket ovat ulkohalkaisijaltaan ¾″ eli 19.05 mm. Putkien seinämävahvuus on 1.09 mm. Putket ovat U-muotoisia ja niiden säteet vaihtelevat 82 mm:stä 1618 mm:iin. Putkien pituudet ovat 21.406 metristä 26.548 metriin. Putket ovat aseteltu niin, että ne muodostavat puoliympyrän kuten kuvasta 3 nähdään. (Lasserre 2007, s. 11.)



Kuva 3. Lämmönsiirtoputkien muodostelma

Putkinippujen sivutuenta on toteutettu yhdeksällä putkitukilevyllä (TSP) ja yhdellä virtauksenjakolevyllä (FDB). Putkitukilevyt on valmistettu austeniittisesta ruostumattomasta teräksestä, ja niiden paksuus on 30 mm. Tukilevyt on numeroitu 1–9 höyrystimen pohjasta ylöspäin. Putket eivät ole kiinni tukilevyissä, vaan ne kulkevat kolmilehtikuvion (trefoil design) muotoisten reikien kautta (kuva 4). (Lasserre 2007, s. 11.)



Kuva 4. Tukilevyjen rakenne (mukaillen Söllner 2006, s. 23).

Tämä muotoilu sallii putkien pienen liikkumavaran, vähentäen kulumista ja parantaen tukirakenteen kestävyyttä. Tällä tukilevyrakenteella vähennetään myös korroosiotuotteiden

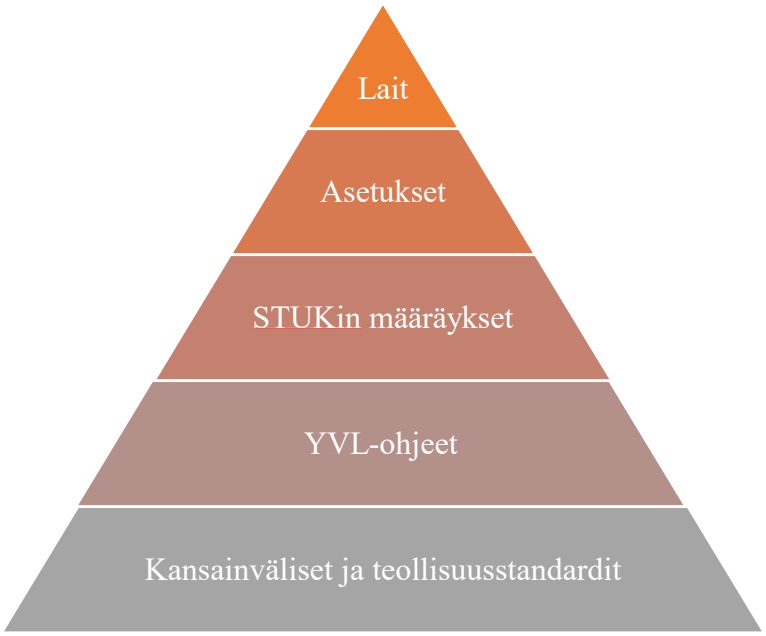
kerääntymistä kyseisiin kohtiin, mikä voisi johtaa lommoutumiseen tai putkien korroosiovaurioitumiseen. Virtauksen jakautumista ohjaava levy sijaitsee ensimmäisen putkitukilevyn ja putkilevyn yläosan välissä. Virtauksenjakolevy on 19 mm:n paksuinen ja siinä olevat reiät ohjaavat höyryä takaisin kohti putkinipun keskustaa. (Lasserre 2007, s. 11.)

Putkipaketin U-taivutuksen alueella on neljä tärinänestotankoa (AVB). Nämä tukirakenteet ovat muotoilultaan V-muotoisia ja niiden tehtävänä on vaimentaa putkiston aiheuttamaa värähtelyä ja tärinää. Jokaisessa putkessa tärinänestotankojen risteyskohtien lukumäärä vaihtelee rivin mukaan, ja ne voivat olla väliltä yhdestä kahdeksaan. Kunkin tärinänestotangon poikkileikkaus on 12x4,6 mm. (Lasserre 2007, s. 11.)

2.2 Valmistus

Ydinvoimaloiden höyrystimet valmistetaan hyväksytyn laadunvarmistusohjelman kanssa. Kaikki työvaiheet raportoidaan ja tarkastetaan. Koska höyrystimet ovat painelaitteita ja osa ydinvoimalaitosta, niitä koskevat tiukat säädökset ja määräykset. Suomessa ydinvoimalaitosten on noudatettava ydinenergialakia (990/1987), ydinenergia-asetusta (161/1988) sekä Säteilyturvakeskuksen (STUK) määräyksiä ja Ydinturvallisuusohjeita (YVL- ohjeita). (Myllymaa & Ryyppö & Nurmi 2023, s. 13.)

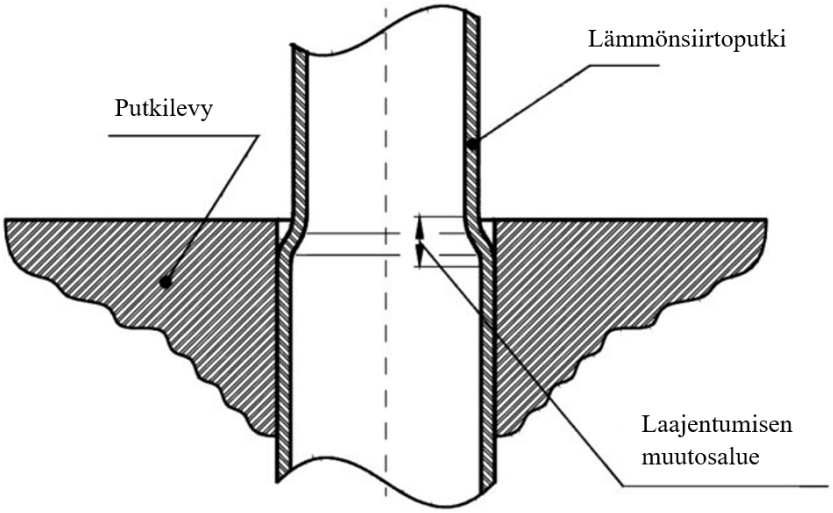
Säännöstön noudattamisen helpottamiseksi on erilaisia kansainvälisiä teollisuusstandardeja. Näistä yksi merkittävimpiä ovat ASME Code Section III sekä RCC-M, joita on hyödynnetty höyrystimien valmistuksessa. Laeista, asetuksista ja määräyksistä ei saa poiketa, mutta YVL-ohjeista voidaan myöntää poikkeuksia, mikäli turvallisuustaso säilyy (Myllymaa et al. 2023 s.13). Määräyksien noudattamista valvoo STUK. Kuvassa 5 näkyy ydinvoimalaitosta koskevat määräykset. (Smith 2017, s. 50.)



Kuva 5. Eri ohjeet ja määräykset tärkeysjärjestyksessä (Myllymaa et al. 2023, s. 13).

Lämmönsiirtoputkien kiinnityksessä putkilevyyn käytetään automatisoitua TIG-hitsausta (Tungsten Inert Gas) ilman lisäainetta. Tässä menetelmässä hyödynnetään pulssivirtatekniikkaa suojakaasun alla ja sillä mahdollistetaan tarkka ja korkealaatuinen hitsausliitos. Hitsausprosessin tarkkuus on ratkaisevaa, sillä se vaikuttaa putkiston mekaaniseen lujuuteen ja kykyyn kestää korkeita paineita ja lämpötiloja ilman vaurioita. (Depoortere 2010, s. 44.)

Hitsaamisen jälkeen putket laajennetaan tiiviiksi putkilevyyn (kuva 6) kaksivaiheisella prosessilla. Ensimmäisessä vaiheessa putki laajennetaan pienemmällä paineella, jolloin se mukautuu putkilevyn profiiliin. Toisessa vaiheessa käytetään korkeampaa painetta, jotta saavutetaan optimaalinen istuvuus ja lujuus. Tämä menetelmä vahvistaa putken ja putkilevyn välistä mekaanista lujuutta. (Depoortere 2010, s. 44–45.)



Kuva 6. Lämmönsiirtoputket laajennetaan putkilevyyn istuvuuden ja tiiveyden parantamiseksi (mukaillen Cizelj & Roussel 2014, s. 121).

Kaksivaiheinen laajennusprosessi mahdollistaa tarkemman kontrollin putken laajennuksesta, varmistaa tiiviimmän liitoksen ja minimoi jäännösjännitykset, jotka voisivat edistää korroosiota ja halkeilua. (Depoortere 2010, s. 45.)

Höyrystinputkien sisä- ja ulkopintojen pinnankarheus on keskeinen tekijä niiden tehokkuudessa ja kestävyydessä. Sisäpinnan suhteellisen sileä pinta parantaa lämmönsiirtoa ja vähentää kerrostumien ja korroosion riskiä, kun taas ulkopinnan sileys auttaa vähentämään mekaanista kulumista ja parantaa pinnan puhdistettavuutta. (Lasserre 2007, s. 13.)

Valmistuksen aikana laatua on seurattu tarkasti ja sen aikana on tehty erilaisia tarkastuksia. Laadulla tarkoitetaan tässä yhteydessä sitä, että tuote on virheetön ja se täyttää asetetut vaatimukset ja standardit. Valmiille höyrystimelle tehtiin tarkastus ennen käyttöönottoa. Siinä katsottiin höyrystin kattavasti läpi ja mm. lämmönsiirtoputkista tarkastettiin kaikki pyörrevirtamenetelmällä. Niissä on etsitty valmistuksen aikaisia vikoja ja muita näyttämiä. Varsinaisia vikoja ei höyrystimeen sallita, mutta kaikki mahdolliset muutkin poikkeamat merkattiin ylös. (Cochaud 2016, s. 10.)

2.3 Materiaalit

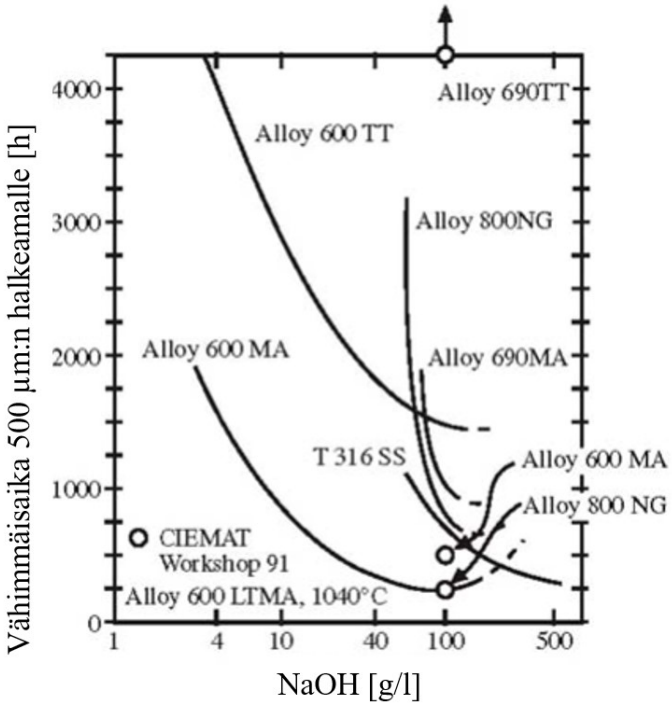
Höyrystimien lämmönsiirtoputkien materiaalina on käytetty lämpökäsiteltyä metalliseosta Inconel 690 (I-690TT), joka tunnetaan myös nimellä NC 30 FE. Tämä metalliseos kuuluu superseoksiin ja koostuu nikkelistä, kromista ja raudasta. Inconel 690 erottuu korkean nikkeli- ja kromipitoisuutensa ansiosta, mikä takaa erinomaisen korroosion- ja hapettumiskestävyyden sekä kyvyn kestää korkeita lämpötiloja. Inconel 690 kestää lämpötiloja kryogeenisistä tasoista aina noin 1093 °C:een asti, mikä on huomattavasti korkeampi kuin laitoksen käyttölämpötila 351 °C. Inconel 690:tä hyödynnetään erityisesti ydinreaktoreissa, ja höyrystimen lämmönsiirtoputkissa, sen erinomaisen korroosion- ja säteilynkestävyyden ansiosta. (Meunier 2004, s. 10–12.)

Inconel 690TT -metalliseosta on hyödynnetty lukuisissa laitoksissa, eikä siinä ole toistaiseksi havaittu korroosiota käytön aikana. Kokemusperäisiä tietoja on kertynyt yli 186 eri höyrystimestä, jotka sijaitsevat Yhdysvalloissa, Ranskassa, Belgiassa sekä Isossa-Britanniassa. Lisäksi Electric Power Research Instituten (EPRI) putkien hajoamisennusteiden mukaan höyrystimissä, joissa käytetään I-690TT-putkea ja joissa kuumayhde toimii noin 326 °C:n lämpötilassa, ei ennusteiden mukaan esiinny korroosioon liittyvää hajoamista ennen 51 vuoden jatkuvaa täystehoista käyttöä, mikä johtuu pääasiassa putkimateriaalin lisääntyneestä korroosionkestävyydestä. (Lasserre 2007, s. 15; EPRI 2003, s. 27.)

Maailmalla höyrystimissä käytetään pääasiassa kuutta eri materiaalia. Näitä ovat nikkeliseokset Inconel 600, Inconel 600TT, Inconel 690TT, Monel 400 ja Incoloy 800NG. Lisäksi VVER-tyyppisissä ydinvoimalaitoksissa, kuten Loviisan ydinvoimalassa, höyrystimien materiaalina käytetään austeniittista ruostumatonta terästä 08Ch18N10T. (IAEA 2023, s. 12.)

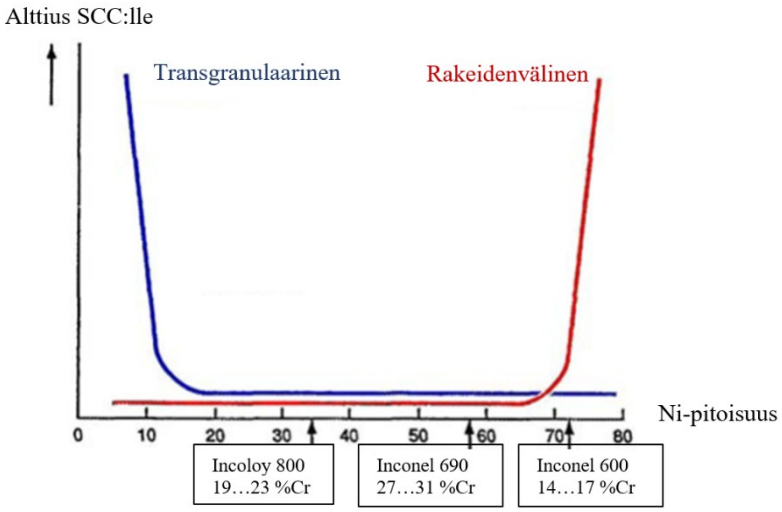
Aikaisemmin höyrystimien materiaalina on käytetty yleisesti Inconel 600, mutta se on todettu olevan altis erilaisille vikaantumismekanismeille, erityisesti jännityskorroosiolle. Tämän seurauksena Inconel 600 -putket on korvattu joko Inconel 690TT- tai Incoloy 800NG -materiaaleilla, jotka tarjoavat paremman korroosionkestävyyden. Parempi

korroosionkestävyys johtuu pääasiassa korkeammasta kromipitoisuudesta ja lämpökäsittelystä, jotka tuottavat korroosionkestävän mikrorakenteen (IAEA 2023, s. 12–13). Kuva 7 esittää eri metalliseosten halkeaman muodostumisaikaa NaOH-pitoisuudessa (g/l). Kuva osoittaa, että Inconel 690TT -seoksella on paras vastustuskyky halkeamien muodostumista vastaan verrattuna muihin materiaaleihin, kuten Alloy 600 ja Alloy 800. Tämä tekee siitä suotuisan materiaalivalinnan korkeissa lämpötiloissa ja emäksisissä ympäristöissä. (IAEA 2011a, s. 36–37.)



Kuva 7. SG-putkien materiaalien halkeilualttiuden vertailu (IAEA 2011a, s. 47–48).

Kuva 8 vertailee nikkelipitoisuuden vaikutuksesta halkeamisprosesseihin kolmessa eri materiaalissa. Kuvasta voidaan havaita, että I-690 ei ole nikkelipitoisuuden vuoksi suuressa riskissä halkeamien suhteen. (IAEA 2011a, s. 37.)



Kuva 8. Kaaviokuva nikkelipitoisuuden vaikutuksesta halkeamisprosesseihin kolmessa höyrystimen putkimateriaalissa, joita on rasitettu hieman myötörajan yläpuolella 350 °C:n vedessä (mukaillen IAEA 2011a, s. 37).

2.4 Olosuhteet

Ydinvoimalaitoksen höyrystimet toimivat olosuhteissa, joissa ne altistuvat korkeille lämpötiloille, paineille ja radioaktiivisille ympäristöille. Höyrystimen lämpöolosuhteisiin liittyy reaktorin käyttösykleistä, käynnistyksistä ja pysäytyksistä johtuvia syklisiä lämpötilamuutoksia. Nämä lämpötilan vaihtelut aiheuttavat lämpöjännityksiä, jotka voivat vaikuttaa höyrystimen komponenttien rakenteelliseen eheyteen. Mekaaniset rasitukset johtuvat paineeroista, värähtelyistä ja järjestelmän sisäisestä nestevirtauksesta. Lisäksi syövyttävät ja kuluttavat aineet lisäävät entisestään höyrystimen mekaanisia haasteita. Isona ongelmana on sakkautumien muodostuminen ja syövyttävien epäpuhtauksien (esim. kloridi, sulfaatti) kertyminen, jotka yhdessä höyrystimien-putkiseoksen kanssa vaikuttavat paikallisesti syövyttävien olosuhteiden muodostumiseen. Sakkautumiin voidaan vaikuttaa vesikemian avulla. (Laroche 2017, s. 81–104.)

2.4.1 Kuormitukset

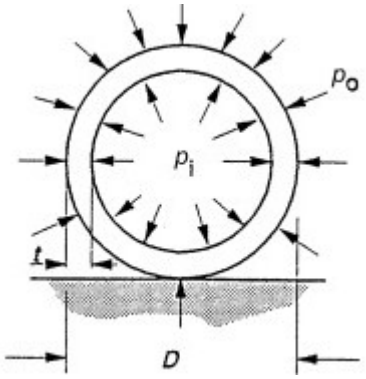
Mekaanisesti höyrystimien on kestettävä höyryn ja veden aiheuttama jatkuva paine sekä niiden oma huomattava paino ja liitettyjen rakenteiden aiheuttamat ulkoiset voimat. Lämpökuormitukset ovat toinen haaste, sillä lämmönsiirrosta aiheutuu merkittävää lämpöjännitystä. Primääripiirin suunnittelupaine on 17.5MPa ja sekundääripiirin 9.9MPa. Vastaavasti lämpötilat ovat 351 °C ja 311 °C. (Depoortere 2010, s. 31.)

Höyrystimen primääri- ja sekundääripuolien välille on asetettu paine-erojen rajat: suurin sallittu paine-ero primääri/sekundaari on Δp = 12,5 MPa ja sekundaari/primääri Δp = 4,6 MPa. (Foucart 2004, s. 21). Kun putkien sisäinen paine ylittää ulkoisen paineen, putken seinämät altistuvat vetojännitykselle (kuva 9), joka pyrkii laajentamaan putken halkaisijaa. Tämä aiheuttaa merkittäviä kehäsuuntaisia jännityksiä (hoop stress), joiden suuruus riippuu paine-erosta ja putken seinämän paksuudesta alla olevan kaavan mukaisesti (Bai & Bai 2014, s. 10):

$$\sigma_h = \frac{\Delta p D}{2t} \tag{1}$$

Missä, σ_h on kehäjännitys, Δp on paine-ero, D on putken halkaisija ja t on seinämän vahvuus.

Kehäjännitys saavuttaa maksiminsa, kun paine-ero on suurimmillaan. Suurimman sallitun paine-eron perusteella laskettu kehäjännitys on 125 MPa. Materiaalin myötöraja käyttölämpötilassa on 210 MPa. Kehäsuuntaisten jännitysten lisäksi esiintyvät myös pitkittäiset jännitykset (longitudinal stress), jotka ovat usein pienempiä kuin kehäsuuntaiset, mutta voivat vaikuttaa materiaalin kestävyyteen pitkällä aikavälillä. Jos paine-ero vaihtelee käyttöolosuhteiden aikana, materiaali altistuu sykliselle kuormitukselle, mikä voi johtaa materiaalin väsymiseen ja säröjen syntymiseen. Vastakkaisessa tapauksessa, kun ulkoinen paine ylittää sisäisen paineen, putkien seinämiin kohdistuu puristusjännityksiä, jotka voivat pahimmillaan johtaa putkien lommoutumiseen. (McKeen 2016, s. 3.)



Kuva 9. Paineen takia putken seinämiin voi kohdistua sekä veto, että puristusjännityksiä (Bai et al. 2014, s. 10).

Lämpötilajännityksen syntyminen putkimaisessa rakenteessa liittyy materiaalin lämpölaajenemisen ja geometrian yhdistelmään. Kun lämpötilagradientti vallitsee putken sisä- ja ulkopintojen välillä, syntyy jännityksiä materiaalin poikkileikkauksessa. Tässä tapauksessa lämpötilat putken sisällä ja ulkopuolella ovat 351 °C ja 311 °C. Koska materiaali pyrkii laajenemaan lämpötilan nousun seurauksena, sisäpinnan lämpimämpi lämpötila aiheuttaa suuremman laajenemispaineen kuin ulkopinta. Tämä epätasainen laajeneminen johtaa jännityksiin, joiden suuruus pienenee seinämän sisäpinnalta ulkopintaan päin edetessä. (Sun & Shi & Yang & Yang & Li & Liu 2016, s. 400–410.)

Putki-putkilevy liitoksessa voi esiintyä jäännösjännityksiä, jotka ovat peräisin valmistusmenetelmistä. TIG-hitsauksessa syntyy jäännösjännityksiä hitsauksen aiheuttaman lämmön seurauksena. Hitsausprosessin nopea kuumeneminen ja jäähtyminen luo lämpögradientteja, jotka johtavat vetojännityksiin hitsausalueella. Lisäksi hitsauksen aikana tapahtuva materiaalin paikallinen laajeneminen ja supistuminen aiheuttaa muodonmuutoksia, jotka voivat aiheuttaa muodonmuutoksia liitokseen. Hitsausprosessiin liittyy myös metallurgisia muutoksia, kuten rakeiden kasvua, mikä voi lisätä materiaalin kovuutta ja vaikuttaa jännitysjakaumiin. (Rossini & Dassisti & Benyounis & Olabi 2012, s. 574.)

Nestevirtaus rakenteissa voi aiheuttaa virtauksen aiheuttamia värähtelyjä (FIV), jotka voivat tietyissä tapauksissa johtaa väsymisvaurioihin tai kitkakulumiseen. Lisäksi sisäinen

kemiallinen ympäristö voi olla syövyttävä syöttöveden sisältämien epäpuhtauksien, kuten hapen ja mineraalien, vuoksi. (VTT 2023, s. 4.)

Reaktorin sydämestä tuleva ionisoiva säteily aiheuttaa höyrystimen komponentteihin kohdistuvia rasituksia jatkuvan altistumisen myötä. Tämä säteily johtaa materiaalin mikrorakenteen muutoksiin, kuten kovettumiseen ja haurastumiseen. Lisäksi säteily lisää materiaalin alttiutta korroosiolle ja jännityskorroosiohalkeilulle. (Was 2007, s. 581–613.)

2.4.2 Vesikemia

Vesikemia on kriittinen osa ydinvoimalaitosten toimintaa, ja veden fysikaaliskemiallisten ominaisuuksien tarkka seuranta ja valvonta ovat olennainen osa laitoksen eri prosesseja. Vesikemian keskeisiä tehtäviä ovat voimalaitoksen pitkän käyttöiän ja korkean käyttöasteen varmistaminen sekä korroosion ehkäiseminen. Tämä saavutetaan huolellisella prosessikemikaalien säädöllä ja valvonnalla. Vesikemian hallinta vaikuttaa merkittävästi laitoksen tärkeiden osien, kuten höyrystimien ja muiden keskeisten metallikomponenttien, rakenteelliseen eheyteen. Oikein ylläpidetty vesikemia ehkäisee näiden komponenttien korroosiota ja vaurioitumista. (Depoortere 2010, s. 112–114.)

Sekundääripiirissä ylläpidettävässä High All-Volatile-Treatment (High-AVT) -vesikemiassa prosessivesi alkaloidaan, siitä poistetaan happi ja varmistetaan epäpuhtauksien kuten kloridin ja raudan alhainen pitoisuus. Näillä toimilla saadaan aikaan pelkistävät olosuhteet. Veden pH -arvon nostamiseksi veteen annostellaan hydratsiiniliuosta. Lämmön ja oksidien vaikutuksesta hydratsiini hajoaa prosessissa ammoniakiksi ja vedyksi alla olevan kaavan mukaisesti (Lehr 2020, s. 11–22):

$$3N_2H_4 \rightarrow 4NH_3 + N_2 \quad (2)$$

Tällä menetelmällä vesi-höyrykierron syöttöveden pH-arvoksi saadaan 25°C > 9,9. Todellisessa tilanteessa kun lämpötila on 270 °C pH-arvo on n. 6,5. (Lehr 2020, s. 11–22.)

Vesi toimii voimalaitoksissa sekä työ- että jäähdytysnesteenä, ja sen laadulla on ratkaiseva vaikutus lämmönsiirron tehokkuuteen. Huonosti hallittu vesikemia voi johtaa epäpuhtauksien kerrostumiseen laitoksen rakenteisiin, mikä heikentää lämmönsiirtoa ja hidastaa veden virtausta järjestelmän läpi. Syöttöveden virtaus höyrystimeen on satoja tonneja tunnissa, joten jo pienetkin epäpuhtauspitoisuudet voivat muodostua merkittäviksi. Pienet määrät rautaa muodostavat prosessivedessä hapettuessaan magnetiittia, joka jää kerrostumiksi höyrystimiin. Magnetiitti muodostuu alla olevan kaavan mukaisesti (Depoortere 2010, s. 113–114):

$$3Fe+4H_2O \rightarrow Fe_3O_4+4H_2 \quad (3)$$

Epäpuhtauksien kertymisestä syntyvää kerrostumaa kutsutaan lietteeksi (sludge), joka koostuu pääosin magnetiitista. Lietettä on kahdenlaista: pehmeää lietettä ja kovaa lietettä. Pehmeä liete on irtonaista kerrostumaa, joka sisältää korroosiotuotteita, kämuten rautaoksideja, sekä muita epäpuhtauksia, jotka kulkeutuvat höyrystimeen syöttöveden mukana. Ajan myötä nämä hiukkaset kertyvät putkilevyille ja lämmönvaihtoputkien alaosiin. Kova liete on tiiviimpi ja kovettuneempi lietteen muoto, joka syntyy pitkään kertyneiden epäpuhtauksien ja korroosiotuotteiden kemiallisesta sitoutumisesta tai sintrautumisesta korkean paineen ja lämpötilan vaikutuksesta. Lietteet saavat aikaan vaurioitumisen riskiä kasvattavat olosuhteet, mutta kovalla lietteellä riski on vielä suurempi paikalliselle korroosiolle, erityisesti kerrostumien alla tapahtuvalle korroosiolle, sillä se voi sitoa kosteutta ja kemikaaleja putkien pinnalle. (Strohmer 2013, s. 2–13.)

Höyrystimille tehdään vuosihuolloissa lietteen poistaminen (Sludge lancing). Sen tavoitteena on poistaa kerrostumat höyrystimen lämmönsiirtotehokkuuden parantamiseksi ja pitkäaikaisen korroosiovaurion estämiseksi. Lietteen poisto voidaan tehdä kemiallisena tai korkeapainepesuna. Kemiallisessa pesussa on ongelmana ydinvoimalaitoksen herkkä ympäristö ja tarkka vesikemia. Kovan lietteen poistaminen on vaikeampaa kuin pehmeän lietteen, ja se vaatii usein aggressiivisempia puhdistusmenetelmiä. Joissakin tapauksissa voidaan käyttää

myös mekaanisia laitteita, joilla kalkki ja liete kaavitaan pois. Tämä menetelmä on harvinaisempi, koska se saattaa vahingoittaa komponentteja. Lietettä voidaan joutua poistamaan jopa kymmeniä kilogrammoja. (Drexler 2017, s. 127–153.)

Vesikemian kannalta ongelmallisia ovat erilaiset laitostilat, joille on erilaiset vaatimuksensa. Laitostiloja ovat kylmäseisokki, käynnistystila ja tehokäyttö. Teoriassa kylmäseisokki ja käynnistystilaa tarvitaan vain vuosittaisissa vuosihuolloissa. Lisäksi tehokäytöllä laitoksen tehoa säädellessä säädetään myös syöttöveden virtausta. (Lehr 2020, s. 11–22.)

Oikea vesikemia myös primääripiirissä on ratkaisevan tärkeää laitoksen turvallisuuden ja tehokkaan toiminnan kannalta. Se vähentää reaktorisydämen ulkopuolisia aktiivisuus kertymiä ja säteilykenttiä, mikä edistää henkilökunnan turvallisuutta (YVL B.5 2019). Veden pH-arvoa säätämällä voidaan vaikuttaa aktiivisuuskertymiin. Höyrystimistä oletetaan yleensä vapautuvan paljon nikkeliferriittejä, joiden pääsyä reaktorisydämeen pyritään tällä säädöllä minimoimaan. (Odar 2011, s. 1–3.)

3 Vauriomekanismit

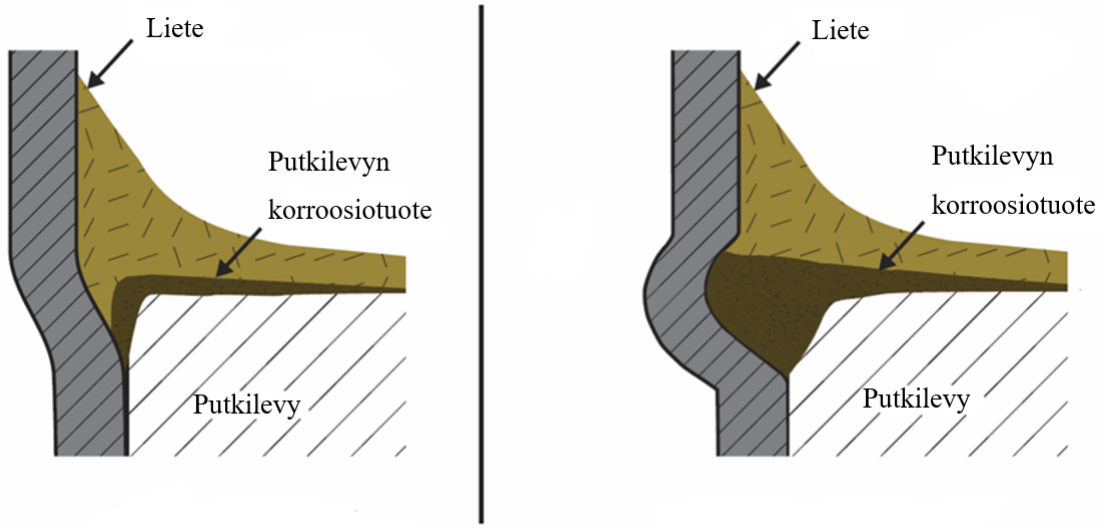
Höyrystimien yleisiä vikaantumismekanismeja ovat erilaiset korroosioilmiöt, jännityskorroosiohalkeilu sekä mekaaninen kuluminen. Korroosio, joka johtuu metallipintojen ja ympäröivän ympäristön välisistä kemiallisista reaktioista, voi johtaa komponenttien ohenemiseen ja heikentää rakenteellista eheyttä. Yleisesti höyrystimet toimivat jatkuvassa painekuormituksessa sekä korroosiolle altistavissa olosuhteissa. (IAEA 2011a, s. 29.)

3.1 Mekaaninen kuluminen

Mekaaninen kuluminen käsittää materiaalien asteittaisen hajoamisen fyysisen kosketuksen, kitkan ja kulumisen seurauksena. Putkille voi tapahtua myös muodonmuutoksia kuten lommoutumista. Syklinen kuormitus voi altistaa putket myös väsymiseen. (Lasserre 2007, s. 16.)

3.1.1 Lommoutuminen

Putken lommoutuminen (denting) tarkoittaa paikallisia muodonmuutoksia tai painaumia putken pinnalla. Ne johtuvat yleensä iskuista, painekuormista tai muista ulkoisista voimista. Siinä putken halkaisija pienenee johtuen korroosiotuotteiden kertymisestä putken tukilevyn alle, putkilevyn yläosaan tai tukilevyn siirtymisestä, tärinästä tai muista mekaanisista syistä. Yleisin syy on kuitenkin lietteen tunkeutuminen putkilevyyn kuvan 10 mukaisella tavalla. (EPRI 2014, s. 1–3.)



Kuva 10. Havainnollistus putkilevyn yläreunan lommoutumisesta (EPRI 2014, s. 1).

3.1.2 Kuluminen

Kulumisella tarkoitetaan materiaalin irtoamista pinnoilta erilaisten mekanismien vaikutuksesta. Tämä johtaa painohäviöön, mitta- ja muotopoikkeamiin sekä pinnan laadun heikkenemiseen. Kuluminen johtuu toistuvasta mekaanisesta kosketuksesta, usein putkien ja ympäröivien osien, kuten tukien ja tärinänestotankojen välillä. Tämä johtuu yleensä virtauksen aiheuttamista värähtelyistä (FIV), joissa turbulenttinen virtaus aiheuttaa värähtelyjä. Värähtelyt johtavat osien väliseen kosketukseen ja lopulta kitkakorrosioon, joka voimistaa ilmiötä. (IAEA 2011a, s. 72.)

Eroosio johtuu suurnopeuksisen höyryn tai veden vaikutuksesta putkien pintoihin, erityisesti alueilla, joissa virtausnopeus on kasvanut, kuten mutkissa tai virtausrajoituksissa. Tämä ilmiö aiheuttaa materiaalin kulumista, ja prosessia voi tehostaa eroosiokorroosio, jossa suuret virtausnopeudet nopeuttavat materiaalin kemiallista syöpymistä. Putkissa voi tapahtua myös asteittaista materiaalihäviötä (wastage), joka johtuu kemiallisista tai sähkökemiallisista reaktioista ympäristön kanssa. (Gorman 2017, s. 168.)

3.1.3 Säteilyn aiheuttama turpoaminen

Säteilyn aiheuttama turpoamisella tarkoitetaan materiaalitieteessä, erityisesti ydinreaktoreissa, materiaalin tilavuuden laajenemista (swelling). Tämä johtuu materiaalin rakenteen säteilyvauriosta, joka johtuu pääasiassa neutronisäteilystä. Ydinreaktoreissa tämä ilmiö voi esiintyä komponenteissa, jotka altistuvat suurille neutronivirroille, kuten reaktorisydämessä ja höyrystimessä. Suuret neutronisäteilyt voivat synnyttää koloja ja makroskooppista rakenteen muodonmuutosta. Turpoaminen voi heikentää putkien rakenteellista eheyttä. Kun materiaali turpoaa, se voi aiheuttaa jännityksiä putken seinämiin. Tämä jännitys voi aiheuttaa muodonmuutoksia, halkeilua tai jopa repeytymistä ajan myötä. (Was 2007, s. 8–12; YVL A.8 2019.)

3.1.4 Väsyminen

Väsymisvaurio on toistuvan kuormituksen aiheuttama halkeamien muodostuminen ja leviäminen. Useimmat väsymismurtumat johtuvat syklisistä kuormituksista, jotka ovat huomattavasti pienempiä kuin kuormitukset, jotka johtaisivat materiaalin myötäämiseen. Vikaantuminen johtuu kuormituksen syklisestä luonteesta, joka saa aikaan mikroskooppisen materiaalin epätäydellisyyden kasvamaan makroskooppiseksi säröksi. Särö voi edetä kriittiseen kokoon, joka johtaa komponentin rakenteelliseen tai painekuorman aiheuttamaan vikaantumiseen. Väsymissäröt alkavat yleensä jännityskeskittymissä, rakenteellisissa epäjatkuvuuskohdissa. Väsymissäröt voivat myös levitä olemassa olevista makroskooppisista säröistä, kuten hitsausvirheistä. (IAEA 2011a, s. 88–99.)

Höyrystimien lämmönsiirtoputkissa värähtely on otettu huomioon suunnitteluvaiheessa ja mm. värinänestotangot vähentävät väsymiselle altistumista. Rakenteiden yli kulkeva nestevirtaus voi kuitenkin aiheuttaa värähtelyjä, jotka voivat tietyissä tapauksissa johtaa väsymisvaurioihin tai kitkakulumiseen (VTT 2023, s. 11–14). Korkeat lämpötila ja paine vaihtelut voivat altistaa myös väsymiselle (Laroche 2017, s. 95).

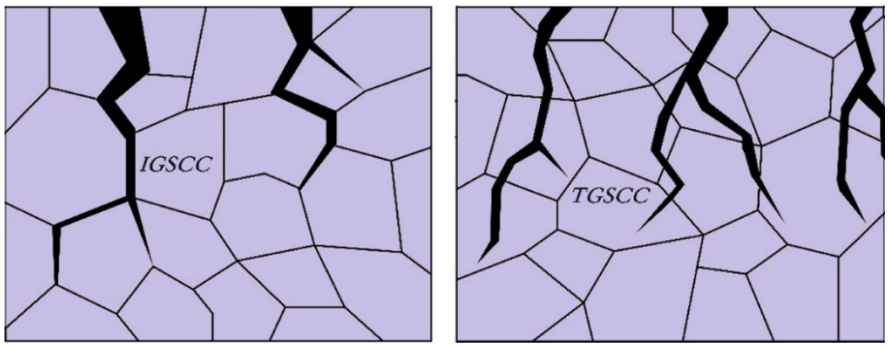
3.2 Kemiallinen syöpyminen

Kemiallinen syöpyminen ts. korroosio on prosessi, jossa materiaalit, tyypillisesti metallit, heikkenevät ympäristönsä kanssa tapahtuvien kemiallisten reaktioiden seurauksena. Mahdollisia korroosiotyyppejä ovat mm. piste-, rako-, jännitys-, eroosio- ja hankauskorroosio.

3.2.1 Jännityskorroosio

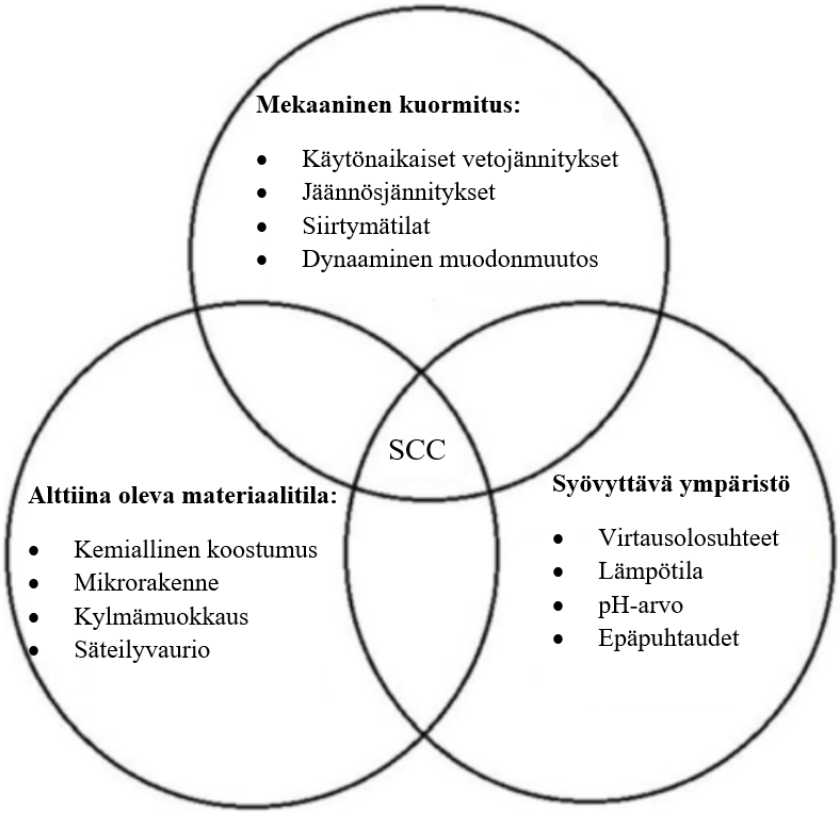
Jännityskorroosio (SCC) on ilmiö, jossa metalli alkaa syöpyä vetojännityksen ja syövyttävän ympäristön yhteisvaikutuksesta. Ilman syövyttävää ympäristöä metalli kestäisi saman vetojännityksen ilman murtumista. Vetojännitys voi olla peräisin ulkoisista kuormituksista tai syntyä metallin sisäisten jännitysten seurauksena, jotka muodostuvat usein kylmämuokkauksen tai hitsauksen aiheuttamien rakenteellisten muutosten myötä. (IAEA 2011b, s. 3–5.)

Jännityskorroosion mekanismit ovat monimutkaisia ja niihin liittyy useita mikroskooppisia ja atomitason ilmiöitä. Syöpymisen alkuvaiheessa metallin pinnalle muodostuu pieniä pistekorroosiokohtia tai raerajasyöpymiä, jotka toimivat murtumisen alkupisteinä. SCC voi tapahtua kahdella eri tavalla: transgranulaarisesti, jossa murtuma etenee metallirakeiden läpi, tai intergranulaarisesti, jossa murtuma kulkee raerajojen pitkin (kuva 11). Kyseisistä ilmiöistä voidaan käyttää nimityksiä Intergranular Stress Corrosion Cracking (IGSCC) ja Transgranular stress corrosion cracking (TGSCC). (IAEA 2011b, s. 3.)



Kuva 11. IGSCC ja TGSCC eroavaisuus (Amiri & Toor & Shams 2024, s. 297).

Jännityskorroosion syntyminen edellyttää kolmen kriittisen tekijän samanaikaista läsnäoloa: jännityskorroosiolle altis materiaali, vetojännitys ja vesipitoinen ympäristö. Kuvassa 12 on esitetty jännityskorroosion kriittiset tekijät. Teoreettisesti SCC voidaan estää poistamalla yksi näistä tekijöistä tai vähentämällä jokin niistä alle tietyn kynnysarvon, mikä estää syövyttävän reaktion etenemisen. (IAEA 2011b, s. 3–5.)



Kuva 12. Jännityskorroosio edellytyksenä on kolme eri tekijää (IAEA 2011b, s. 4).

Höyrystimessä voi esiintyä myös säteilyn kiihdyttämää jännityskorroosiota (IASCC) sekä putkien sisäpuolella hapettomassa korkealämpötilaisessa primäärivedessä tapahtuvaa jännityskorroosiota (PWSCC) (YVL A8 2019; IAEA 2011b, s. 8–9).

Yksi yleisimmistä jännityskorroosion muodoista on ulkohalkaisijan jännityskorroosiohalkeilu (ODSCC). Se on hajoamismekanismi, jossa putkien ulkopinnoilla esiintyy rakeiden välistä jännityskorroosiohalkeilua (IGSCC) ja raerajakorroosiota (IGA). IGA on korroosion

muoto, jossa materiaalin rakeiden väliset rajat syöpyvät ilman merkittävää halkeilua. Useimmat ulkohalkaisijan jännityskorroosiohalkeamat ovat aksiaalisuuntaisia, mutta kehänsuuntaiset halkeamat ovat mahdollisia erityisesti epäjatkuvuuskohdissa, kuten putken laajennuskohdissa ja lommoissa. (IAEA 2011a, s. 69–72.)

3.2.1 Korroosioväsyminen

Korroosioväsymisessä metalli altistuu värähtelyille, vaihtuville kuormituksille tai lämpötilan vaihteluille, ja sen väsymiskestävyys heikkenee syövyttävässä ympäristössä. Tämä tarkoittaa, että särö syntyy ja kasvaa nopeammin kuin tavallisesti. Korroosioväsyminen muistuttaa jännityskorroosiota, sillä molemmissa vaurio tapahtuu, kun jännitys ja syövyttävä ympäristö vaikuttavat yhdessä. Murtuma alkaa yleensä raerajamurtumana yhdestä tai useammasta kohdasta. (IAEA 2011a, s. 88–90.)

Korroosioväsyminen käynnistyy paikallisesta liikkeestä tai tärinästä, mikä rikkoo metallin kiderakenteen. Liike paljastaa metallista pieniä alueita, joissa suojaamaton, puhdas metalli altistuu ympäristölle. Nämä alueet imevät itseensä syövyttäviä aineita, mikä estää metallin palautumisen alkuperäiseen muotoonsa. Kun liike toistuu edestakaisin, metalli lopulta murtuu. Syövyttävä ympäristö poistaa (kuvitteellisen) väsymislujuuden raja-arvon tai vähintään lyhentää aikaa, jonka kuluessa liike ylittää tämän rajan ja johtaa metallin hajoamiseen. (Oechsner 2015, s. 72–73.)

3.2.2 Piste- ja rakokorroosio

Piste- (pitting) ja rakokorroosio ovat erittäin paikallisia korroosion muotoja. Pistekorroosio on ilmiö, jossa metallin pinta syöpyy paikallisesti huomattavasti nopeammin kuin tasainen syöpyminen. Jokin kohta metallipinnassa alkaa toimia anodina johtuen esimerkiksi pinnoitteen rikkoutumisesta tai hitsauksen aiheuttamista metallin kiderakenteen epämuodostumista. Pistekorroosio johtaa pienten reikien eli kuoppien syntymiseen komponenttien pintaan.

Korroosio voi esiintyä joko syvälle metalliin ulottuvana ja pistemäisenä tai laajemmalle alueelle levittäytyvänä, mutta ei niin syvälle tunkeutuvana. (Oechsner 2015, s. 89–90.)

Pistesyöpymiä esiintyy yleensä putkilevyn lietepinon alla tai putken ja putken tukilevyn välisissä raoissa. Pistesyöpymistä esiintyy tyypillisesti lämmönsiirtoputkien pinnalla olevien passiivisten oksidikerrosten paikallisesti heikoissa kohdissa. Nämä herkät kohdat voivat johtua metallin paikallisesta kylmämuokkauksesta, metallikarbidien, sulfidien tai muiden sekundaaristen faasihiukkasten esiintymisestä tai raerajojen syntymisestä metallipinnalle. (IAEA 2011a, s. 74–75.)

Rakokorroosio muistuttaa suurelta osin pistekorroosiota. Sitä esiintyy tyypillisesti rakenteiden suljetuilla tai heikosti saavutettavilla alueilla, kuten putkien kannattimissa, kerrostumien alla tai mekaanisissa liitoksissa. Esimerkiksi putkilevyn yläosassa kovan lietteen muodostuminen voi synnyttää kriittisiä olosuhteita, jotka altistavat materiaalin rakokorroosiolle. Ilmiötä voidaan välttää vesikemialla ja hyvällä puhdistuksella. (Oechsner 2015, s. 91–91; Revie 2008, s. 350–354.)

3.2.3 Eroosiokorroosio

Eroosiokorroosio on ilmiö, jossa materiaali heikkenee kemiallisen vaikutuksen ja mekaanisen kulumisen yhteistuloksena. Tässä ilmiössä virtaava neste irrottaa metallin pinnalta suojaavan korroosiotuotteen kerrosta, mikä kiihdyttää korroosiota, erityisesti kun nesteiden virtausnopeus ylittää kriittisen arvon. Eroosiokorroosiota havaitaan laitteissa ja järjestelmissä, joissa nesteen virtausnopeus on suuri, virtaus on turbulenttista ja neste sisältää ilmakuplia tai kiinteitä hiukkasia. Nämä ilmakuplat ja hiukkaset lisäävät korroosionopeutta, kun samalla mekaaninen kulutus laajentaa syöpymiselle altista pinta-alaa ja estää kestävän suojakerroksen muodostumista. (Oechsner 2015, s. 67; YVL A8 2019.)

Eroosiokorroosiota voi esiintyä myös nopeasti virtaavassa höyryssä, jossa höyryyn sekoittuneet vesipisarat käyttäytyvät samalla tavalla kuin ilmakuplat. Eroosiokorroosio johtuu yleensä metallipinnoilla olevien suojaavien oksidikerrosten liukenemisesta suurilla väliainevirroilla, mikä estää oksidikerrosten uudelleen rakentumisen. Tämän seurauksena metallipinnat menettävät suojan veden aiheuttamaa metallin liukenemista vastaan, mikä johtaa materiaalin nopeaan irtoamiseen pinnalta. Esimerkiksi höyrystimissä putkien pinnoilla olevien oksidikerrosten liukeneminen voi tapahtua erityisesti, kun putkipaketin reunalla olevien putkien tukilevyt altistuvat suurinopeuksisen höyryn kuljettamille vesipisaroille. (IAEA 2011a, s. 78.)

3.2.4 Kitkakorroosio

Kitkakorroosio (fretting) on kulumis- ja vauriomekanismi, joka syntyy, kun metallipinnat ovat jatkuvassa suhteellisessa liikkeessä toisiaan vasten, usein yhdistettynä suureen paineeseen. Tämä ilmiö on yleinen ympäristöissä, joissa metalliosat liikkuvat ja tärisevät keskenään. Korroosiota voi pahentaa syövyttävien aineiden läsnäolo. Kitkakorroosiossa metallien välinen hankaus tuottaa usein hienojakoisia metallioksideja. Jopa vähäinen tärinä riittää rikkomaan metalleja suojaavan pintakerroksen, vaikka pintojen varsinainen kosketusala on usein pieni suhteessa kokonaispinta-alaan. Kitkakorroosion aiheuttamat vauriot peittyvät yleensä tehokkaasti, koska korroosiotuotteet täyttävät kulumiskohdat. Kuitenkin näistä kulumakohdista voi alkaa väsymisen aiheuttamia murtumia. Kitkakorroosiota esiintyy erityisesti irto-osien läsnä ollessa sekä tärinänestotankojen ja tukien kohdilla. (Hassan 2017, s. 421–422.)

4 Vauriomekanismien havaitseminen

Laitoksen ikääntymisenhallinnan näkökulmasta lämmönsiirtoputken vikaantuminen tapahtuu silloin, kun ainetta rikkomattomalla tutkimuksella saadut merkit edellyttävät, että putki on korjattava tai poistettava käytöstä. Tarkastustoiminnan periaatteena on ennalta ehkäisevää toiminta, jonka vuoksi vuotoon asti edenneet vikaantumiset ovat harvassa. Vikaantuneet putket tulpataan tai sukitetaan (sleeving). Höyrystimiä tarkastetaan laitoksien vuosihuolloissa vaurioiden varalta. Painelaitelaki edellyttää höyrystimille määräaikaistarkastuksia. (IAEA 2011a, s. 182–191.)

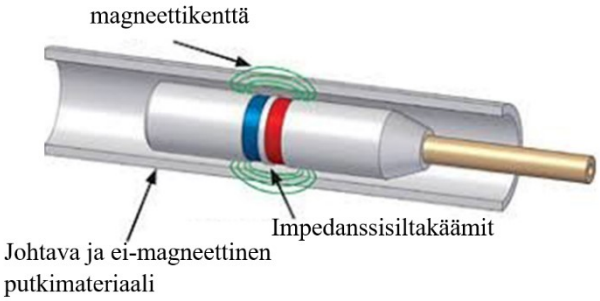
Höyrystimien lämmönsiirtoputkien sisäpinnalle pääsee käsiksi höyrystimen primääripuolen kuuman tai kylmänyhteen puolelta. Tulpattuja putkia lukuun ottamatta kaikkia putkia pääsee tarkastamaan. Tulpatuista putkista ilmoitetaan kunkin höyrystimen putkikartassa. Höyrystimen alaosassa on korkea säteilytaso, joten työt tehdään pääosin mekanisoidusti. Höyrystimen ympäristössä tapahtuvat työvaiheet ovat laitteiden asennukset ja antureiden vaihdot. Manipulaattoreiden liikuttaminen sekä tietojen keruu ja analysointi tapahtuvat toimistoympäristössä. Tarkastuksia varten lämmönsiirtoputkien on oltava puhtaita, kuivia sekä lämpötilan täytyy olla laskenut alle 40 ° C välille. (Lasserre 2007, s. 13.)

4.1 Tarkastusmenetelmät

Määräaikaistarkastuksissa lämmönsiirtoputkille tehdään ainetta rikkomattomia koestuksia (NDT). NDT-tarkastuksissa niiden kuntoa valvotaan vahingoittamatta itse putkia. Lämmönsiirtoputkille tyypillinen tarkastusmenetelmä on pyörrevirtatarkastus. Lisäksi lämmönsiirtoputkien kuntoa voidaan tarkastella myös silmämääräisesti sekä painekokeilla. (IAEA 2011a, s. 182.)

4.1.1 Pyörrevirtatarkastukset

Pyörrevirtatestaus on prosessi, jossa elektronisia antureita ajetaan erityyppisten putkien pituussuunnassa etsien niistä vikoja. Pyörrevirtatestaus perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Kun vaihtovirtaa kuljettava kela tuodaan metallinäytteen lähelle, vaihtovirtaan liittyvä muuttuva magneettikenttä indusoi näytteeseen pyörrevirtoja. Pyörrevirta kulkee näytteessä kelan käämin suuntaisesti, mutta vastakkaiseen suuntaan kuin kelan primaarivirta (kuva 13). Pyörrevirtaan liittyvä sekundäärinen magneettikenttä on primaarisen magneettikentän vastainen. Näytteessä olevat viat häiritsevät pyörrevirran kulkua, mikä pienentää kelan resistanssia ja muuttaa sen tehollista reaktanssia. (Udpa 2004, s. 1–3.)



Kuva 13. Pyörrevirta tarkastuksen periaate (mukaillen Olympus 2024).

Kelan indusoimaa jännitettä seuraamalla ja virran pysyessä vakiona impedanssin muutos voidaan rekisteröidä johtavan näytteen, kuten metalliputkien, vikojen paikantamiseksi. Kelan impedanssin amplitudi- ja vaihevaihteluista voidaan luonnehtia vika. Vian on katkaistava pyörrevirtapolku, jotta se voidaan havaita. Virtapolun suuntainen vika ei aiheuta merkittävää katkosta eikä sitä välttämättä havaita. Tästä syystä on erilaisia luotaimia. (Udpa 2004, s. 1–3; Robles Guemes 2023a, s. 13–21.)

Pyörrevirralla havaittavia vikoja ovat erilaiset muodonmuutokset, kuluminen sekä säröt ja halkeamat. ASME:n suositus suurimmasta hyväksyttävästä vian syvyydestä 40 % putken nimellispaksuudesta eli lämmönsiirtoputkien osalta 0.436 mm (Lasserre 2007, s. 19–20.)

Yleisimmin käytössä ovat Bobbin luotaimet. Bobbin luotaimet liitetään analogisiin yksitaajuuslaitteisiin, joissa on mittalaite impedanssin liikeratojen näyttämistä varten. Bobbin-luotaimien etuihin kuuluu niiden edullinen hinta ja nopea skannausnopeus, tyypillisesti jopa 1 metri sekunnissa (1 m/s). Bobbin-luotaimet ovat epäherkkiä kehän suuntaisille halkeamille, koska indusoitu pyörrevirta on vikojen suuntaan eikä tällaisten vikojen olemassaolo luonnostaan vaikuta niihin. Lisäksi niillä on rajoitettu resoluutio vikojen paikantamisen ja karakterisoinnin suhteen. Pääasiallinen käyttötarkoitus on alustavan heikkenemisen havaitseminen, jotta voidaan tunnistaa alueet, jotka vaativat lisätarkastusta muilla luotaimilla, joilla on parempi kyky mitata vaurioiden koko ja luonne. (Robles Guemes 2023a, s. 30–48.)

Pinnalla liikkuvat Rotating Pancake Coil (RPC) luotaimet ovat täydentäviä luotaimia, joita käytetään putkessa olevien vikojen ja muiden ongelma-alueiden tutkimiseen. Näitä ovat U-taivutus- sekä siirtymäalueet, joissa putken halkaisija muuttuu. Näillä antureilla voidaan havaita sekä aksiaaliset että kehän suuntaiset halkeamat ja saada tietoa vian tarkemmasta koosta ja sijainnista. (Robles Guemes 2023b, s. 30–32) Lisäksi on olemassa Array-luotain. Se havaitsevat muihin verrattuna paremmin ODSCC:n kehän suuntaisia säröjä. Lisäksi jotkin magneettiset kerrostumat putken sisällä peittivät myös särösignaalit ja array-luotain sopii silloin hyvin. (Udpa 2004, s. 2; Robles Guemes 2023c, s. 28–30.)

Keväällä 2024 Olkiluoto 3 oli ensimmäisessä vuosihuollossa. Sen aikana tehtiin pyörrevirtatarkastuksia SG 30 ja SG 40 höyrystimille. Ensimmäisen käytön aikaisen tarkastuksen (ISI) jälkeen tuloksia vertailtiin valmistuksen jälkeisen tarkastuksen (PSI) raportteihin tarkastussuunnitelman mukaisesti. (Westinghouse 2024a, s. 5.)

4.1.2 Visuaalinen tarkastus

Höyrystimen putkilevyä tarkastellaan visuaalisesti hyödyntäen erillisiä kamerajärjestelmiä. Kameroita ohjataan manipulaattorin avulla. Pääsy putkilevyn alueelle edellyttää käsiaukkojen avaamista. Visuaalisesti putkilevystä on havaittavissa lietteet putkilevyllä sekä mahdolliset irto-osat. Lisäksi visuaalisesti voidaan havainnoida sisäosien yleistä kuntoa.

Visuaalisesti höyrystintä voidaan tarkastaa sekä primääri- että sekundääripuolelta. (Sollier 2017, s. 477–480.)

Irto-osat järjestelmässä voivat aiheuttaa vakavia vikoja komponenteille ja heikentää koko järjestelmän toimintavarmuutta. Pieni teräslastu voi esimerkiksi virtauksen mukana liikkuessaan tai täristessään vaurioittaa putkia tai muita kriittisiä komponentteja merkittävästi. Olkiluodossa on käytössä monipuoliset ja tarkat menettelyt, joilla pyritään estämään irto-osien pääsy prosessiin tai laitteisiin, kuten tarkastukset ja suojaustoimenpiteet. Irto-osasuojauksella varmistetaan laitteiden luotettava toiminta, prosessin puhtaus sekä työntekijöiden ja ympäristön turvallisuus. Tämä ennaltaehkäisee myös henkilöstön säteilyaltistumista ja kontaminaation riskejä. Irto-osasuojauksesta käytetään myös englanninkielistä termiä Foreign Material Exclusion (FME). (Saarinen 2023, s. 6.)

4.1.3 Painekoe

Painelaitteiden yleinen testausmenetelmä on painekoe. Sen avulla voidaan epäsuorasti arvioida höyrystimen putkissa mahdollisesti olevia halkeamia. Painekokeessa havainnoidaan nesteen vuotoa tai nesteen paineen muutosta. (Sollier 2017, s. 487–488.)

4.2 Korjausmenetelmät

Höyrystimien lämmönsiirtoputkien tulppaaminen ja sukittaminen ovat kunnossapitotekniikoita, joita käytetään, mikäli tarkastuksissa havaitaan riittävän suuria näyttämiä. Kun putki todetaan vialliseksi, se poistetaan käytöstä asettamalla putken molempiin päihin tulppa. Tulppaaminen voidaan tehdä mekaanisesti (laajentamalla tulppa putken päähän) tai hitsaamalla. Tulpat ovat suunniteltu niin, että ne voi tarvittaessa poistaa ja tutkia vauriota lisää. Höyrystimet suunnitellaan siten, että ne säilyttävät riittävän lämmönsiirtotehokkuuden, vaikka osa (esimerkiksi 10 %) putkista tulpattaisiin. (IAEA 2011a, s. 230–231.)

Sukittamalla voidaan vahvistaa ja korjata höyrystimen putkien viallisia tai huonokuntoisia osia poistamatta niitä kokonaan käytöstä. Putken vaurioituneeseen osaan työnnetään holkki, joka on tyypillisesti valmistettu Inconelin tai muiden korkean suorituskyvyn seosten kaltaisista materiaaleista. Holkki laajennetaan niin, että se istuu tiiviisti putken seinämää vasten, ja kiinnitetään sitten esimerkiksi hydraulisella laajentamisella. Uudelleen pinnoittaminen mahdollistaa putken jatkuvan käytön, jolloin höyrystimen tehokkuus säilyy. (IAEA 2011a, s. 232–236.)

5 Vauriomekanismien esiintyvyys

Materiaalin 690TT käyttökokemukset alkavat vasta 1980-luvulta, mutta ne ovat olleet tähän saakka positiivisia. Käyttökokemusten perusteella seoksia 690TT ja 800NG pidetään korroosioriskin kannalta samanarvoisina, joten niiden käyttökokemukset ovat verrannollisia keskenään. Taulukossa 1 on esitetty Siemensin valmistamien höyrystimien vaurioiden syitä vuosina 1972–2008. Kyseisissä höyrystimissä on käytetty materiaalina joko 690TT tai 800NG. (IAEA 2011a, s. 35; VTT 2023, s. 18.)

Taulukko 1. Siemensin painevesireaktorilaitoksien 31.1.2009 mennessä tapahtuneiden höyrystimien putkivaurioiden syyt (VTT 2023, s. 18).

Laitos	Kuluminen		Kitkakorroosio			Ulkopinnan SCC			Pit.	Cav.	Muut	Yhteensä
	Ext.	Local	AVB	LP	SCO	Grid	TS	TTS				
A[1]	315	12	2	-	-	-	-	-	-	-	6	335
B	115	-	12	1	-	-	-	9	-	-	-	137
C	4	14	167	7	-	28	-	-	-	-	12	232
D	492	22	61	3	-	-	35	3	-	-	80	696
E	7	11	53	5	-	-	1	2	2	29	2	112
F	4	1	6	20	-	-	-	-	-	-	4	35
G	-	31	1	12	10	15	15	25	-	-	3	112
H	1	-	-	19	-	-	-	-	-	-	2	22
I[2]	-	-	4	24	2	-	-	-	-	21	7	58
J[1]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
K[2]	-	-	3	3	7	-	-	-	-	-	-	13
L	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	1	5
M	-	-	2	-	2	-	-	-	-	-	1	5
N[2]	-	-	-	6	28	-	-	-	-	-	6	40
O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Q[2]	-	-	1	24	3	-	-	-	-	-	3	31
R	-	-	-	-	1	-	-	-	-	8	-	9
R1[3]	-	-	-	11	-	-	-	-	-	-	-	11
R2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
R3[3]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
R4	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	3	10
R5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
R6	-	-	1	6	-	-	-	-	-	-	5	12
R7	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1
R8[3]	-	-	-	16	-	-	-	-	-	-	1	17

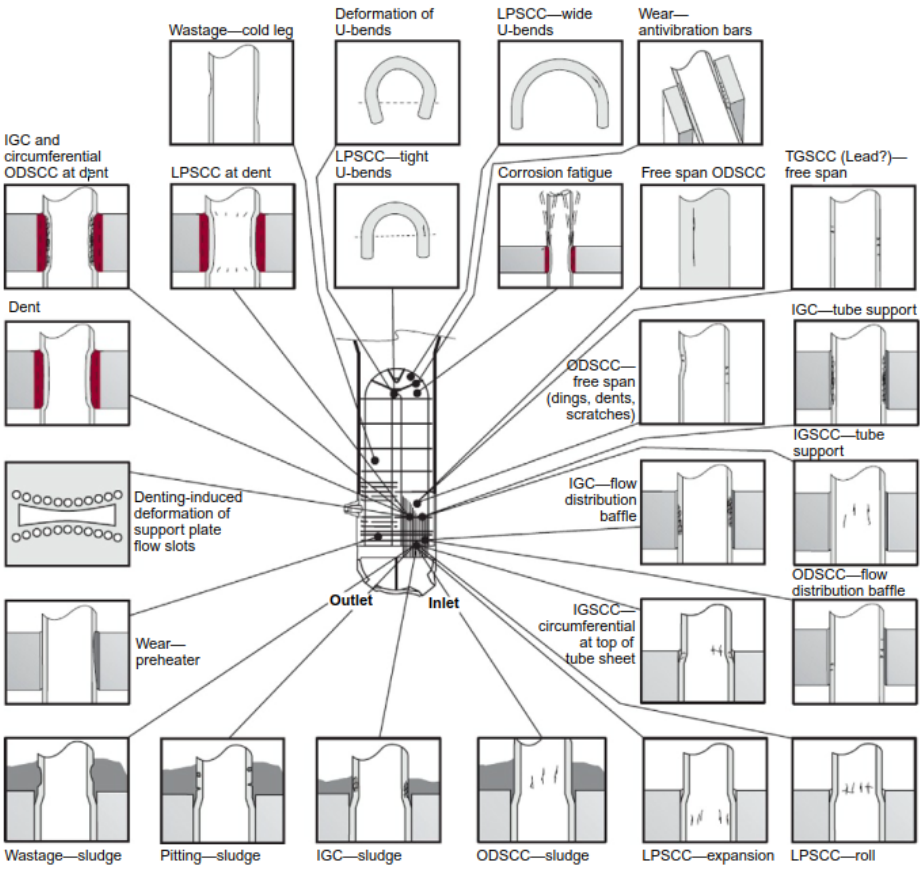
Taulukko 1 jatkuu. Siemensin painevesireaktorilaitoksien 31.1.2009 mennessä tapahtuneiden höyrystimien putkivaurioiden syyt (VTT 2023, s. 18).

Laitos	Kuluminen		Kitkakorroosio			Ulkopinnan SCC			Pit.	Cav.	Muut	Yhteensä
	Ext.	Local	AVB	LP	SCO	Grid	TS	TTS				
Yhteensä	938	91	313	169	53	43	51	39	2	58	136	1893

Lyhenteet:
Cav. Putkilevyn puhdistuksesta aiheutuva kavitaatio
Ext. Laajamittainen
LP Irto-osat
Pit. Pistekorroosio
SCO Rakenneosa
TS Putkilevyn alue
TTS Putkilevyn yläosa

1) Suljettu ydinvoimala
2) Esilämmittimellä varustetut höyrystimet.
3) Inconel 690 -putket (loput ovat Inconel 800 -putkia).

Taulukosta voidaan nähdä, että yleisin vikaantuminen on ollut yleinen kuluminen sekä AVB:n sekä irto-osien aiheuttamat kitkakorroosiot. Jännityskorroosiota ei kyseisillä materiaaleilla ole enää juurikaan havaittu. Kuvassa 14 on esitetty erilaisia vauriomekanismeja höyrystimen eri osissa.



Kuva 14. Mahdollisia vauriomekanismeja höyrystimen eri osissa (Gorman 2017, s. 157).

Suurin osa kuvan 14 tapauksista liittyy jännityskorroosioon. Vaikka ilmiötä ei odoteta esiintyvän, se on havaittavissa käytössä olevilla tarkastusmenetelmillä. Kriittisimmät alueet ovat AVB-osuudessa sekä putkilevyjen yläosassa. Lietettä kertyy erityisesti putkilevyjen yläosaan, missä lommoutuminen ja korroosioilmiöt todennäköisimmin esiintyvät. Kuvassa 14 IGC:ksi eli intergranulaariseksi korroosioksi määriteltyä korroosiotapaa kutsutaan yleisemmin IGA:ksi eli raerajakorroosioksi ja LPSCC eli matalan potentiaalin jännityskorroosiohalkeamaksi määriteltyä korroosiotapaa kutsutaan yleisemmin PWSCC:ksi eli primääriseksi vesijännityskorroosiohalkeamaksi. (Gorman 2017, s. 156–157.)

Taulukossa 2 on esitetty yleisimpiä vaurioita todennäköisyysjärjestyksessä. Vakavuudeltaan kaikki ovat samanvertaisia, sillä lopputuloksena on putkivuoto. Taulukossa on myös vikojen yleisimmät sijainnit sekä niiden ennaltaehkäisytavat. Kyseiset viat ovat kaikki havaittavissa pyörrevirtatarkastuksilla. Uusien höyrystimien suunnitteluvaiheessa tehtävillä materiaalivalinnoilla voidaan taulukossa 1 esitettyjen kokemusten perusteella vetää johtopäätöksiä taulukon 2 järjestykselle.

Taulukko 2. Yleisimpiä vaurioita odotetun todennäköisyyden järjestyksessä

Vauriomekanismi	Syyt	Sijainnit	Vaurioiden ennaltaehkäisy
1. Kitkakorroosio	Virtauksen aiheuttama värähtely ja kosketuksissa olevien materiaalien aiheuttama mekaaninen kuluminen	Putkien ja irtonaisten osien välinen kosketus. Putkien ja AVB:iden tai putkien ja tukien väliset kosketuspisteet	Irto-osien seuraaminen mahdollinen poistaminen. Kehittyneet geometriat tukilevyissä ja AVB:ssä
2. Kuluminen	Veden epäpuhtaudet	Putkilevyn raot, lietekasat, putkien tukilevyt, AVB:t	Veden laadun hallinta
3. Lommoutuminen	Happi, kuparioksidi, kloridit, lämpötila, pH, rakojen kunto, saostumat	Putkien tukilevyissä, lietekasassa, putkilevyn raoissa	Lietteen poistaminen vuosihuolloissa ja vesikemian hallinta
4. Pistekorroosio	kloridit, sulfaatit, happi, kuparioksidit	lietealueilla erityisesti kylmän yhteen puolella	Lietteen poistaminen vuosihuolloissa ja vesikemian hallinta

Taulukko 2 jatkuu. Yleisimpiä vaurioita odotetun todennäköisyyden järjestyksessä

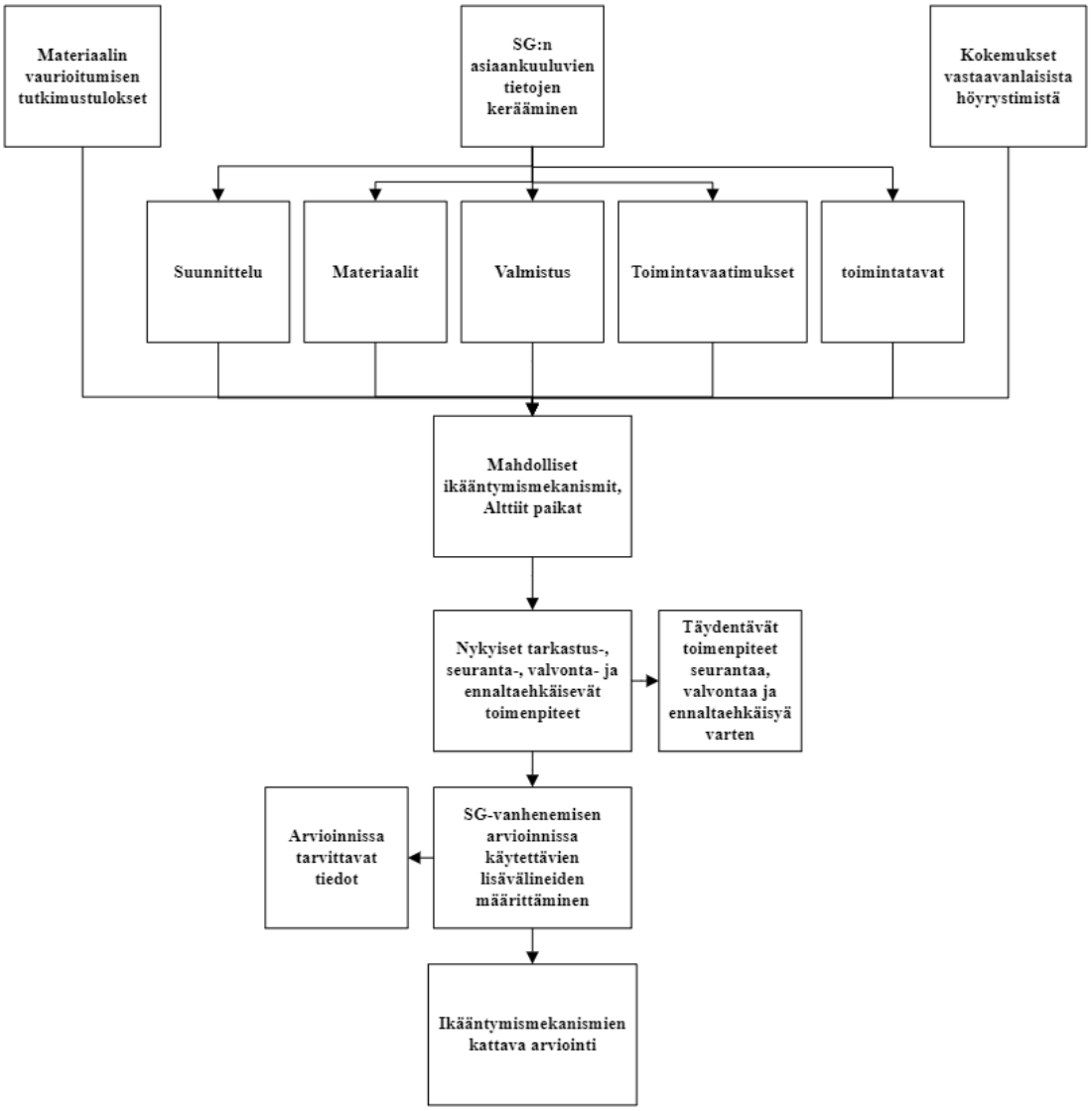
Vauriomekanismi	Syyt	Sijainnit	Vaurioiden ennaltaehkäisy
5. Väsyminen	Korkea keskimääräinen jännitystaso ja virtauksen aiheuttama tärinä, käynnistävä muu vaurio	-	Kehittyneet geometriat tukilevyissä ja AVB:ssä
6. Jännityskorroosio	Jännitykset, epäpuhtauspitoisuudet, herkät materiaalit	-	Vesikemia, materiaalivalinta

6 Tarkastustulosten ja aineiston hallinta

TVO:lla on heidän itse kehittämänsä putkistojen ja komponenttien analysointi- ja seurantajärjestelmä (PAMS). Se on työkalu, joka on suunniteltu parantamaan putkistoja ja reaktorin komponentteja koskevien tietojen hallintaa ja analysointia. Järjestelmä sisältää tietokannat geometrisille tiedoille, materiaaleille, kuormituksille, tuloksille ja dokumentoinnille. Sen käyttäjäystävällisellä käyttöliittymällä voidaan luoda syöttötiedostoja ja suorittaa sovellusohjelmia. Tämä mahdollistaa tiedon hallinnan ja jälkikäsittelyt, kuten väsymis- ja halkeamien kasvuanalyysit. Tämä integrointi takaa luotettavat, ajantasaiset ja helposti saatavilla olevat tiedot, jotka helpottavat kattavia riskinarviointeja ja käytönaikaisia tarkastuksia. (Smeekes & Kuuluvainen 2010, s. 1–3.)

PAMSin pääpaino on ollut putkistojärjestelmissä, mutta tämän työn myötä sitä olisi tarkoitus laajentaa myös höyrystimen komponenteille erityisesti tarkastustietokantaan. Tarkastustietokantaa suunniteltaessa on otettu huomioon poikkitieteellisesti myös eri sidosryhmien tarpeet. Laadunohjauksessa tarkastustietokannan olisi tarkoitus toimia ohjaavana työkaluna tuleviin tarkastuksiin ja lisätä ymmärrystä ikääntymisilmiöistä. Tietokanta integroi kaiken saatavilla olevan tiedon, joka liittyy höyrystimen suunnitteluun, materiaaleihin, valmistusprosesseihin, käyttövaatimuksiin sekä käytännön käyttökokemuksiin (kuva 15).

Tarkastustietokannan tulisi näyttää mitä putkia on aiemmin tarkastettu ja milloin, ja missä on ollut havaintoja tai poikkeamia. Lisäksi tarkastustietokannan olisi tarkoitus tuoda esiin se, mitkä ovat eniten riskialttiit alueet. Tarkastustietokannasta olisi tarkoitus myös nähdä tarkastusohjeet sekä tarkastajien pätevöintien voimassa olot. Lisäksi tarkastustietokantaan voisi lisätä käytetyt tarkastusmenetelmät ja -välineet.



Kuva 15. Ikääntymismekanismien arviointi

PAMSia varten höyrystin on jaettu pienempiin osiin. Putkinippu (Tube Bundle) on yksi kokonaisuus, joka sisältää 5980 putkea ja niille on omat tunnistenumeronsa. Jokaisella putkella on oma koordinaattinsa sekä geometria tiedot. Putkien U-mutkan säteet sekä suorien osuuden pituudet ovat tallennettu geometria tietoihin ja liitetty piirustukset liitteeksi. Jokaisesta putkesta myös kirjataan tarkka huolto- ja tarkastushistoria. PAMS koostuu useista eri ohjelmistoista, joista yksi on Materialbase. Sinne lisätään I690TT-materiaalin fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet sekä materiaalitodistukset.

Pyörrevirtatarkastuksissa kerätty data on monimuotoista ja sen yhteensopivuus tietokannan rakenteen kanssa voi aiheuttaa ongelmia. Tarkastuksissa syntyy valtavia määriä dataa, erityisesti, kun tarkastuksia tehdään säännöllisesti ja kattavasti. Jos käytössä on useita eri tarkastuslaitteita tai ohjelmistoja, voi data tallentua erilaisissa formaateissa, mikä vaikeuttaa yhtenäisen tietokannan ylläpitoa. Standardoinnin puute eri tarkastusten, laitteistojen tai toimijoiden välillä voi johtaa siihen, että tiedot eivät ole vertailukelpoisia keskenään, jolloin tietokannan analysointi ei anna luotettavaa kokonaiskuvaa komponenttien tilasta. Dataa kertyy kauttaaltaan koko putken matkalta, mutta vain erilaiset indikaatiot ajetaan tietokantaan. Indikaatioiden tyyppi, koko ja sijainti merkitään tarkasti tulevaisuutta ajatellen.

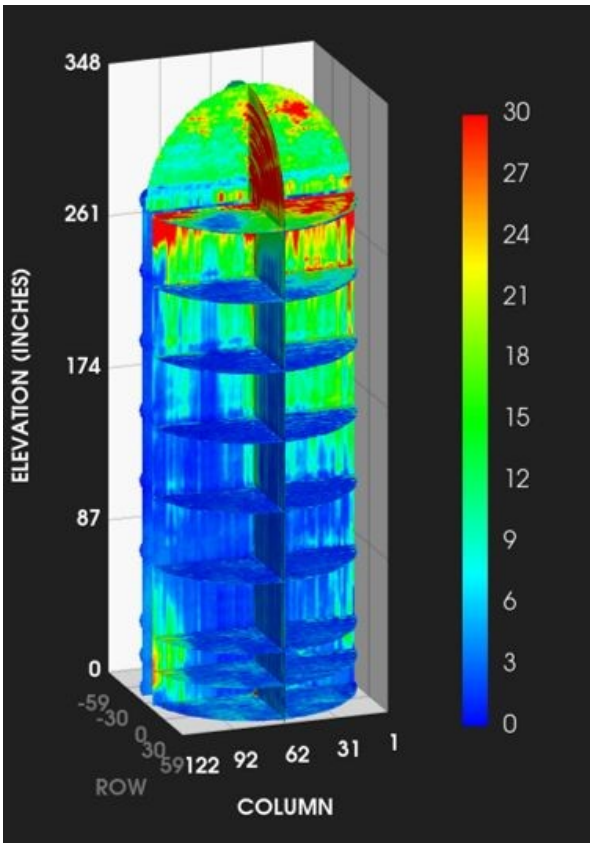
Kun PAMSiin lisätään tietoja voi olla mukana sekä kvalitatiivisia että kvantitatiivisia syöttöarvoja. Kvantitatiivia tietoja ovat sellaiset, jossa käytetään täsmällisiä ja laskennallisia tuloksia. Sellaisia voivat olla erilaisista analyyseista saadut kuormitustiedot, sekä pyörrevirtatarkastuksista saadut tiedot kulumisen määrästä, lietteen kertymisestä tai muodonmuutoksista. Kvalitatiivisesti voidaan arvioiden syöttää esimerkiksi erilaisien tilanteiden vakavuuksia. Esimerkiksi jos havaitaan irto-osa, jota ei voida poistaa voitaisiin tulokseksi syöttää putkikohtaisesti 0–2 taulukon 3 mukaisesti.

Taulukko 3. Esimerkki kvalitatiivisesta riskin arvioinnista irto-osan vaikutukselle

Syöttöarvo	Selite
0	Ei riskiä: Irto-osa ei todennäköisesti aiheuta vaaraa viereisille putkille. Esimerkiksi, jos irto-osa on pieni tai kevytrakenteinen, eikä se osu viereisiin putkiin tai muuta niiden toimintaa.
1	Alhainen riski: Irto-osan aiheuttama riski viereisille putkille on vähäinen mutta olemassa. Tämä voisi tapahtua, jos irto-osa voisi tärähdyksessä koskettaa putkia, mutta ei todennäköisesti aiheuta merkittävää vaurioita.
2	Korkea riski: Irto-osa aiheuttaa merkittävää vaaraa viereisille putkille. Esimerkiksi, jos irto-osa on tarpeeksi suuri tai raskas vahingoittamaan putkia, osuminen voi aiheuttaa murtumia, lommoja tai jopa putkivuotoja.

PAMSin olisi tarkoitus hyödyttää myös kunnossapitoa, kemiaa, sekä käyttöjaosta. Höyrystimien kunnossapidolle merkittävimmät asiat ovat niiden puhdistukset, tulppaukset ja sukitukset. NDT tarkastuksista saa eriteltyä alueet, joilla lietettä esiintyy. Sillä voidaan arvioida

lietteen poiston tarpeellisuutta ja sen vaihtoehtoja, lisäksi voidaan vertailla kerrostumien määrien höyrystimien välillä. Kuvassa 16 on esitetty Westinghousen käyttämä sovellus lietteen kertymiseen.



Kuva 16. Westinhousen käyttämässä sovelluksessa näkyy visuaalisesti lietteen arvioidut määrät ja sijainnit (Westinghouse 2024b).

Tarkastustietokantaan voitaisiin lisätä myös käytön parametreja siitä minkä höyrystimen läpi menee minkäkin verran syöttövettä ja mistä tehdään ulospuhallutuksia. Arvot voi vaihdella paljonkin höyrystimien välillä sillä tehoa säädetään juuri näiden avulla. Näitä tietoja voisi hyödyntää, kun arvioi lietteen kertymistä.

7 Johtopäätökset

Höyrystimen suunnitellussa ja valmistuksessa on pyritty ottamaan huomioon vauriomekanismeihin vaikuttavia asioita. Historiassa eniten vaurioita aiheuttanut syy jännityskorroosio on estetty paremmin korroosiota kestävällä materiaalilla Inconel 690TT. Putkien tuenta on toteutettu niin, ettei merkittäviä värinöitä pääse tapahtumaan ja tuentalevyn muoto on sellainen, että siihen kertyy mahdollisimman vähän lietettä. Lisäksi rakenteessa pitäisi esiintyä hyvin vähän tärinöitä.

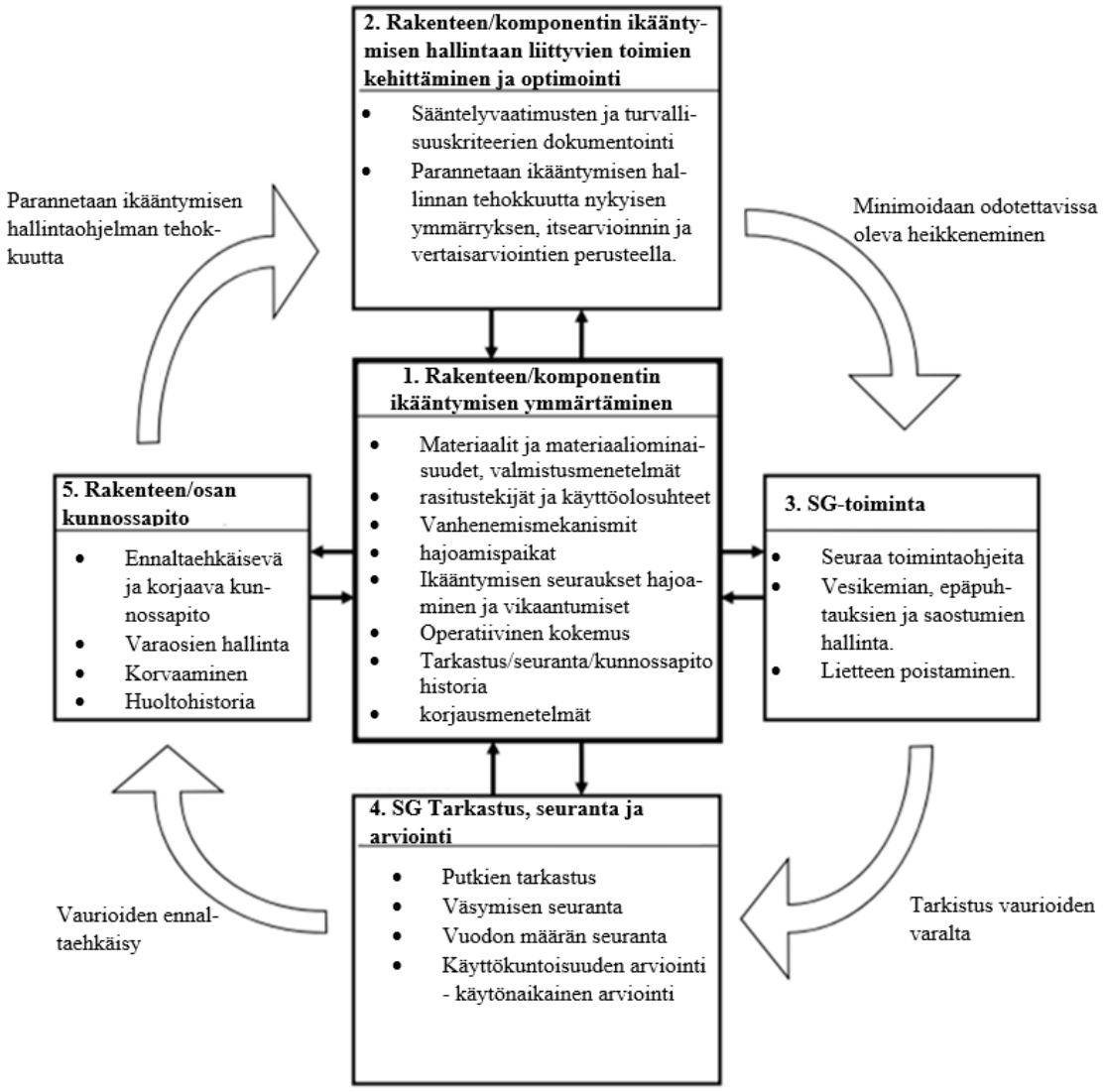
Liete on suurin riskitekijä höyrystimen putkille. Sitä kertyy sinne syöttöveden epäpuhtauksista ja se onkin pääasiassa magnetiittia. Lietteen alla on korroosiolle erittäin alttiit olosuhteet. Lietettä kertyy eniten höyrystimen alaosassa sijaitsevalle putkilevylle. Lietteen seurauksena voi tapahtua lommoutumista putkilevyn ja putken välillä. Lietettä ja mahdollisia vikoja voidaan havaita pyörrevirta- ja visuaalitarkastuksilla. Lisäksi pyörrevirralla on mahdollista nähdä mahdolliset korroosiovauriot lietteen alla. Lietettä voidaan poistaa erilaisin menetelmin ja siksi kunnossapidolliset toimenpiteet ovat pitkällä aikavälillä keskiössä ikääntymisenhallinnan kannalta. Irto-osat ovat myös suuri riskitekijä ja lyhyellä aikavälillä jopa pahempi kuin liete. Irto-osat aiheuttavat putkiin osuessaan kitkakorroosiota.

Muita potentiaalisia vauriomekanismeja ovat erilaiset mekaaniset kulumiset tukilevyjen ja erityisesti värinänestotankojen yhteydessä. Mekaaniset kulumiset voivat edistyä pahemmiksi ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta. Myös reunimmaisista putkista kannattaa seurata eroosiokorroosiota. Kova virtaus ja sen mukana kulkevat epäpuhtaudet tai vesipisarat voivat aiheuttaa kulumista.

Putkien kulumien ennustaminen parametrien yhdistelmien monimuotoisuuden vuoksi on haastavaa, mutta ennustemallin kehittäminen on mahdollista esimerkiksi tilastollisten havaintojen tai tekoälypohjaisten menetelmien, kuten neuroverkkojen (ANN), avulla. Lietteen kertymisen ennustaminen on erityisen tärkeää, sillä se on suoraan yhteydessä

vauriomekanismeihin. Tarkastusten avulla voidaan saada hyvin kattavasti tietoa missä on minkäkin verran lietettä. Lisäksi syöttöveden virtauksen määrästä voisi arvioida mahdollisten kertymien muodostumista.

Tarkastusohjelman kehittäminen vaatii laajaa ymmärrystä höyrystimen eri toiminnoista. Kuva 17 esittää ikääntymisen hallinnan prosessia, jossa sovelletaan jatkuvan parantamisen "Plan-Do-Check-Act" (PDCA) -mallia höyrystimen elinkaaren hallintaan.



Kuva 17. Ikääntymisen hallinnan keskeiset osa-alueet

Esitettyjen riskien arvioinnin huomioiminen suunnittelussa vastaa IAEA-mallia ja taustatyönä tehty arviointiprosessi on osa kehittyvää ikääntymisenhallintaa, joka päivittyy jatkuvasti kokemusten perusteella. Tietoja kerätään koko käyttöiän ajan, jonka aikana saadaan oppia lietteen kertymisestä sekä todellisista käytönaikaisista parametreistä. Käyttöiän aikana myös eri tuet ja muut osat voivat kulua, joka voimistaa värähtelyä.

Lähteet

Amiri, A., Toor, I.U. & Shams, A. 2024. Understanding Stress Corrosion Cracking (SCC), Affecting Variables and Prevention Strategies in Nuclear Power Plants—A Review. Teoksessa: Shams, A., Al-Athel, K., Tiselj, I., Pautz, A. & Kwiatkowski, T. Challenges and Recent Advancements in Nuclear Energy Systems. Springer Nature Switzerland. S. 296–308.

Bai, Q. & Bai, Y. 2014. Subsea pipeline design, analysis, and installation. 1. painos. Waltham, Massachusetts, USA: Gulf Professional Publishing. 824 s.

Cizelj, L. & Roussel, G. 2011. [Luku 7:] Reliability of Degraded Steam Generator Tubes. Teoksessa: Uchanin, V. (toim.) Steam Generator Systems: Operational Reliability and Efficiency. IntechOpen. S. 117-142.

Cochaud, A. 2016. Pre-service-inspection report eddy current inspection of SG tubes [Sisäinen dokumentti] DI-26018. Teollisuuden Voima Oyj, 449 s.

Depoortere, G. 2010. EPR SG Design Basis [Sisäinen dokumentti] NFPMG DC 147 REV. F. Teollisuuden Voima Oyj. 173 s.

Drexler, A. 2017. [Luku 6:] Steam-water cycle chemistry relevant to nuclear steam generators Teoksessa: Riznic J, Steam Generators for Nuclear Power Plants. Iso-Britannia: Woodhead Publishing, Elsevier. S. 127–153.

El-Sefy, M., Ezzeldin, M., El-Dakhakhni, W. & Wiebe, L. 2019. [Luku 51:] System dynamics simulation of the thermal dynamic processes in nuclear power plants. Teoksessa: Na, M. Nuclear Engineering and Technology. S. 1540–1553.

Hassan, M. 2017. [Luku 13:] Flow-induced vibrations in nuclear steam generators Teoksessa: Riznic J, Steam Generators for Nuclear Power Plants. Iso-Britannia: Woodhead Publishing, Elsevier. S. 405-434.

EPRI. 2003. Pressurized Water Reactor Generic Tube Degradation Predictions. USA: Electric power research institute. 358 s.

EPRI. 2014. Steam Generator Management Program: PWR Steam Generator Top-of-Tubesheet Denting. USA: Electric power research institute. 622 s.

Foucart, L. 2004. Functional Requirements on the Steam Generator [Sisäinen dokumentti] NFPSR DC 1006. Teollisuuden Voima Oyj. 29 s.

Gorman, J, 2017. [Luku 7:] Corrosion problems affecting steam generator tubes in commercial water-cooled nuclear power plants Teoksessa: Riznic J, Steam Generators for Nuclear Power Plants. Iso-Britannia: Woodhead Publishing, Elsevier. S. 155-181.

IAEA. 2011a. Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Steam Generators. Vienna: International Atomic Energy Agency. 290 s.

IAEA. 2011b. Stress corrosion cracking in light water reactors: good practices and lessons learned. Vienna: International Atomic Energy Agency. 115 s.

IAEA. 2023. IGALL AMP 116 Steam Generators. Vienna: International Atomic Energy Agency. 15 s.

Laroche, S. 2017. [Luku 4:] Thermalhydraulics, circulation, and steam-water separation in nuclear steam generators. Teoksessa: Riznic J, Steam Generators for Nuclear Power Plants. Iso-Britannia: Woodhead Publishing, Elsevier. S. 81–106.

Lasserre, F. 2007. PSI / ISI Qualification Steam Generator Tubes Input Information [Sisäinen dokumentti] NFQS DC 1035 REV. D. Teollisuuden Voima Oyj. 38 s.

Lehr, R. 2020. Chemistry Handbook Part II Steam Water Cycle [Sisäinen dokumentti] STC-G/2008/en/049. Teollisuuden Voima Oyj. 113 s.

McKeen, L.W. 2016. Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers. Elsevier. 312 s.

Meunier, M. 2004. Steam Generator Tubing Material Data File [Sisäinen dokumentti] NFPMT DC 1036 REV. C. Teollisuuden Voima Oyj. 42 s.

Myllymaa, S., Ryyppö, V. & Nurmi, J. 2023. Ydinlaitoksen luvanvarainen käyttö [Koulutusmateriaali] Teollisuuden Voima Oyj. 104 s.

Oechsner, K. 2015. Special Ageing Management Program for the Steam Generator [Sisäinen dokumentti] PESS-G/2011/en/1106. Teollisuuden Voima Oyj. 101 s.

Olympus. 2024. MultiScan MS5800 for Tube Inspection [Olympuksen www-sivuilla] [Viitattu 3.11.2024]. Saatavilla: https://www.olympus-ims.com/en/ms-5800-tube-inspection/

Odar, S. 2011. [Luku 5:] PWR reactor coolant chemistry. Teoksessa: Riess, R., Odar, S., Kysela, J. & Nordmann, F. 2011. PWR/VVER Primary Side Coolant Chemistry: Volume I – Technical Basis and Recent Discussions. Advanced Nuclear Technology International Europe AB. S. 1–101.

Riznic, J. 2017. Introduction to steam generators—from Heron of Alexandria to nuclear power plants: Brief history and literature survey. Teoksessa: Riznic, J. Steam Generators for Nuclear Power Plants. Iso-Britannia: Woodhead Publishing, Elsevier. S. 3–34.

Robles Guemes, N. 2023a. Technical Justification - Bobbin Probe - Eddy Current Inspection of SG Tubes Olkiluoto Unit 3 [Sisäinen dokumentti] GBRA 184 741 Rev. 02. Teollisuuden Voima Oyj. 180 s.

Robles Guemes, N. 2023b. Technical Justification - Rotating Probe - Eddy Current inspection of SG Tubes Olkiluoto Unit 3 [Sisäinen dokumentti] GBRA 184 742 Rev. 03. Teollisuuden Voima Oyj. 190 s.

Robles Guemes, N. 2023c. Technical Justification - Array Probe - Eddy Current inspection of SG Tubes Olkiluoto Unit 3 [Sisäinen dokumentti] GBRA 184 743 Rev. 03. Teollisuuden Voima Oyj. 165 s.

Rossini, N., Dassisti, M., Benyounis, K. & Olabi, A. 2012. Methods of measuring residual stresses in components. Teoksessa: Materials and Design, 35. S. 572–588.

Saarinen S. 2023. TVO Konsernin irto-osakäytännöt [Sisäinen dokumentti] 113252 Teollisuuden Voima Oyj. 44 s.

Smeekes, P. & Kuuluvainen, O. 2010. Applications of the TVO Piping and Component Analysis and Monitoring System (PAMS). 9 s.

Sollier, T. 2017. Nuclear steam generator inspection and testing. Teoksessa: Riznic J, Steam Generators for Nuclear Power Plants. Iso-Britannia: Woodhead Publishing, Elsevier. S. 471–494.

Smith, J.C. 2017. Steam generator manufacturing. Teoksessa: Riznic J, Steam Generators for Nuclear Power Plants. Iso-Britannia: Woodhead Publishing, Elsevier. S. 55–80.

Strohmer, F. 2013. Hard Sludge Formation in Modern Steam Generators of Nuclear Power Plants – Formation, Risks and Mitigation. 24 s.

Sun, B., Shi, J., Yang, L., Yang, Y., Li, Y. & Liu, S. 2016. Modeling the thermal stress of heat transfer tubes with tube support plate gaps in a steam generator. Teoksessa: Annals of Nuclear Energy, 87. S. 400–410.

Revie, R. W. & Uhlig, H. H. 2008. Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering. 4. painos. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience. 513 s.

Söllner, L. 2006. Technical Basis for the Selection of the Secondary Side Chemistry [Sisäinen dokumentti] 422 228 051. Teollisuuden Voima Oyj. 37 s.

TVO. 2010. Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3 [Tekninen esite]. Teollisuuden Voima Oyj. 64 s.

Udpa, L. 2004. Automated Analysis of Eddy Current Signals for Steam Generator Tube Inspection. 16th World Conference on NDT. Montreal Kanada. 8 s.

VTT. 2023. Literature Review on FIV Damage in Fuel Rods and Steam Generator Tubes. 38 s.

Was, G.S. ym. 2007. Fundamentals of Radiation Materials Science: Metals and Alloys. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag GmbH. 827 s.

Westinghouse. 2024a. Final Report ECT of SG tubing Olkiluoto Unit-3 [Sisäinen dokumentti] GBRA189438 Teollisuuden Voima Oyj. 103 s.

Westinghouse. 2024b. Steam Generator Scale Profiling [Westinghousen www-sivuilla] [Viitattu 3.11.2024]. Saatavilla: https://westinghousenuclear.com/data-sheet-library/steam-generator-scale-profiling

YVL A.8. 2019. Ydinlaitoksen ikääntymisen hallinta. Säteilyturvakeskus. [Viitattu 24.11.2024]. Saatavissa: https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLA-8

YVL B.5. 2019. Ydinvoimalaitoksen primääripiiri. Säteilyturvakeskus. [Viitattu 24.11.2024]. Saatavissa: https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLB-5