



**TURUN
YLIOPISTO**

Jännityskorroosio kiehutusvesilaitoksen reaktoripaineastian yhdehitseissä

Turun yliopisto
Kone- ja materiaalitekniikan laitos
Materiaalitekniikka, Energiateknologian materiaalit
Diplomityö

Laatija:
Inka Pulli

31.3.2026
Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu
Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Diplomityö
Turun yliopisto

Tutkinto-ohjelma, oppiaine: Materiaalitekniikka, Energiateknologian materiaalit

Tekijä: Inka Pulli

Otsikko: Jännityskorroosio kiehutusvesilaitoksen reaktoripaineastian yhdehitseissä

Ohjaajat: TkL Rami Vanninen (Teollisuuden Voima Oyj), DI Antti Kallio (Teollisuuden Voima Oyj)
ja TkT Kimmo Pyyhtiä (Turun yliopisto)

Sivumäärä: 64 sivua

Päivämäärä: 31.3.2026

Ydinvoimaloiden pitkät käyttöiät asettavat vaatimuksia niiden rakenteille ja materiaaleille. Viime vuosisadalla rakennetut ydinvoimalaitokset ja niissä käytetyt materiaalit alkavat ikääntyä ja vaurioitua. Odottamattomat viat voivat johtaa pitkäaikaisiin käyttökatkoihin laitoksella. Jännityskorroosio on ympäristön, materiaalin ja jännitysten samanaikaisesta vaikutuksesta aiheutuva materiaalin vaurioitumismekanismi. Se vaurioittaa laitosten rakenteita ja voi aiheuttaa vuotoja. OL1- ja OL2-laitosten reaktoripaineastian yhteiden eripariliitoshitsit ja niiden Inconel 182 -hitsien on havaittu olevan jännityskorroosiolle alttiita kiehutusvesilaitoksen olosuhteissa. Jännityskorroosion syntymekanismia ei vielä tunneta tarkalleen ja yhteen, joissa sitä esiintyy, ovat ahtaissa, korkeasti säteilevissä ja vaikeasti tavoitettavissa paikoissa. Ongelmaa esiintyy myös useilla muilla kiehutus- ja painevesilaitoksilla.

Työn tarkoituksena on esitellä ongelma ja sen taustat sekä tehdä ajankohtaiskatsaus siitä, mitä yhteiden eripariliitoshitsien Inconel 182 -materiaalin jännityskorroosion synnystä, etenemisestä ja mitigaatiomenetelmistä jo tiedetään tähän mennessä. Työ on kooste yhteiden jännityskorroosioilmiöstä, jonka tarkoituksena on tuoda näkyvyyttä olemassa olevalle riskille, jotta Teollisuuden Voima Oyj:llä on valmius toimia asian tiimoilta. Teollisuuden Voima Oyj:n ja Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n laatimista asiakirjoista tehdään kirjallisuuskatsaus ja asiakirjat koostetaan taulukoon. Taulukko tekee yrityksen aiheeseen liittyvästä sisäisestä tiedonhallinnasta helpompaa. Kirjallisuuskatsaukseen sisällytetään myös julkisesti saatavilla olevia lähteitä.

Jännityskorroosiota ei esiinny, jos jännityskorroosiolle altis materiaali, sille altistava ympäristö tai sille altistavat jännitykset poistetaan. Työssä käsitellään keinoja, joilla säröjen syntyminen ja eteneminen voidaan estää tai hidastaa. Merkittäviä tekijöitä, jotka saavat säröilyn käynnistymään tai sen etenemisen kiihtymään voivat olla muun muassa hitsauksesta jääneet jäännösjännitykset, reaktoriveden epäpuhtaudet sekä materiaalien sähkökemiallinen potentiaali kyseisessä ympäristössä. Joskus taas vika saattaa aiheutua valmistusvirheistä yhteessä tai sattumasta, joka aiheuttaa yhteeseen kuormituksia. Juurisyyen määrittäminen on haastavaa, koska kaikkien yhteeseen vaikuttaneiden kuormitusten ja niiden merkittävyyden selvittäminen sen koko elinkaaren ajalta on mahdotonta. Työssä hitsausjäännösjännitysten todistettiin lujuuslaskelmien avulla olevan merkittävässä asemassa jännityskorroosion muodostumisessa. Särön kasvun seuraaminen on myös haastavaa, koska yhteiden ainetta rikkomattomista tarkastuksissa havaitut indikaatiot eivät aina vastaa todellista särökokoa, jolloin putki voi päästä vioittumaan yllättäen.

Jännityskorroosion mitigoimiseksi on kuitenkin monia eri menetelmiä, joita voidaan hyödyntää samanaikaisesti ilmiön torjumiseksi. Tiedostamalla mahdollisuus ongelmaan ja varautumalla siihen voidaan välttyä turvallisuusriskeiltä, pitkiltä laitoksen käyttökatoilta ja suurilta taloudellisilta tappioilta tai vähintään pienentää riskiä merkittävästi.

Avainsanat: jännityskorroosio, dendriittivälien jännityskorroosio, kiehutusvesilaitos, eripariliitoshitsi, Inconel 182

Sisällysluettelo

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | Johdanto | 7 |
| 2 | Ydinvoima | 9 |
| 2.1 | Teollisuuden Voima Oyj | 9 |
| 2.2 | Yleisimmät ydinvoimalaitostyytit | 10 |
| 2.2.1 | Kiehutusvesilaitoksen toimintaperiaate | 12 |
| 2.2.2 | Painevesilaitoksen toimintaperiaate | 13 |
| 2.3 | Ydinvoiman turvallisuuden tahot | 14 |
| 2.3.1 | Suomen ydinvoiman käyttöön vaikuttavat kansainväliset tahot | 15 |
| 2.3.2 | Ydinvoiman käyttö ja sen turvallisuuden valvonta Suomessa..... | 16 |
| 2.3.3 | Eri tahojen merkitys jännityskorroosion hallinnassa | 18 |
| 2.4 | Jännityskorroosion vaikutukset ydinvoimalassa | 19 |
| 3 | Reaktoripaineastia ja sen yhteet | 21 |
| 3.1 | Reaktoripaineastian rakenne | 21 |
| 3.2 | Reaktoripaineastian yhteen rakenne ja suunnitteluperusteet | 23 |
| 3.3 | Reaktoripaineastian yhteen valmistusmenetelmä | 26 |
| 3.3.1 | Sulahitsaus | 26 |
| 3.3.2 | Puikkohitsaus..... | 27 |
| 3.3.3 | TIG-hitsaus | 28 |
| 3.3.4 | Eripäriiitoshitsien hitsaaminen | 29 |
| 3.3.5 | Lämpökäsittely | 31 |
| 3.3.6 | Valmistuksen kulku | 31 |
| 3.4 | Rikkomaton aineenکوetus | 32 |
| 3.4.1 | Ultraäänitarkastus..... | 33 |
| 3.4.2 | Pyörrevirtatarkastus..... | 34 |
| 3.4.3 | Tarkastusten luotettavuus | 35 |
| 4 | Reaktoripaineastian yhteen säröily kiehutusvesilaitoksella | 38 |
| 4.1 | Jännityskorroosio | 38 |
| 4.2 | Jännityskorroosiolle altistavat tekijät | 40 |
| 4.2.1 | Materiaali | 41 |
| 4.2.2 | Jännitys..... | 42 |
| 4.2.3 | Ympäristö..... | 46 |
| 4.2.4 | Jännityskorroosiota selittävät mekanismit | 47 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 4.3 | Särön kasvu..... | 48 |
| 4.4 | Säröilyyn johtavat tekijät | 50 |
| 5 | Mitigaatiomenetelmät | 52 |
| 5.1 | Vetyvesikemia | 52 |
| 5.2 | Korjausmenetelmät..... | 53 |
| 5.2.1 | Yhteen ulkopinnan päällehitsaus..... | 54 |
| 5.2.2 | Yhteen sisäpinnan pinnoitushitsaus | 55 |
| 6 | Kirjallisuuskatsaus | 57 |
| 7 | Päätelmät..... | 60 |
| | Lähteet..... | 62 |
| | Liitteet..... | 71 |
| | Liite 1. Kootut jännityskorroosioasiakirjat..... | 71 |

Lyhenteet

| | |
|-------|--|
| AGR | engl. <i>advanced gas-cooled reactor</i> , toisen sukupolven kaasujäähdytteinen tehoreaktori |
| ASME | The American Society of Mechanical Engineers |
| BWR | engl. <i>boiling water reactor</i> , kiehutusvesireaktori |
| DMW | engl. <i>dissimilar metal weld</i> , eripariliitoshitsi |
| EPR | engl. <i>European pressurized reactor</i> , eurooppalainen painevesireaktori |
| EPRI | Electric Power Research Institute |
| ET | engl. <i>eddy current testing</i> , pyörrevirtatarkastus |
| FCC | engl. <i>face centered cubic lattice structure</i> , pintakeskinen kuutiollinen kiderakenne |
| FNR | engl. <i>fast neutron reactor</i> , nopea neutronireaktori |
| FZ | engl. <i>fusion zone</i> , sekoittumisvyöhyke |
| GTAW | engl. <i>gas tungsten arc welding</i> , TIG-kaasukaarihitsaus |
| HAZ | engl. <i>heat affected zone</i> , lämpövaikutusalue |
| HWC | engl. <i>hydrogen water chemistry</i> , vetyvesikemia |
| HTGR | engl. <i>high temperature gas-cooled reactor</i> , korkean lämpötilan kaasujäähdytteinen reaktori |
| IAEA | engl. <i>International Atomic Energy Agency</i> , Kansainvälinen atomienergiajärjestö |
| IASCC | engl. <i>irradiation accelerated stress corrosion cracking</i> , säteilyavusteinen jännityskorroosio |
| IDSCC | engl. <i>interdendritic stress corrosion cracking</i> , dendriittiväljen jännityskorroosio |
| IGSCC | engl. <i>intergranular stress corrosion cracking</i> , raerajajännityskorroosio |
| ISI | engl. <i>in-service inspection</i> , määräaikaistarkastus |
| LAS | engl. <i>low-alloy steel</i> , niukkaseosteinen teräs |
| LTCP | engl. <i>low temperature crack propagation</i> , särön eteneminen alhaisissa lämpötiloissa |
| LWGR | engl. <i>light water graphite reactor</i> , kevytvesijäähdytteinen grafiittimoderoitu reaktori |
| NDT | engl. <i>non-destructive testing</i> , rikkomaton aineenkoetus |
| NRC | engl. <i>Nuclear Regulatory Commission</i> , Yhdysvaltain ydinturvallisuusviranomainen |
| NWC | engl. <i>normal water chemistry</i> , normaali vesikemia |
| OL1 | Olkiluoto 1 -laitosyksikkö |
| OL2 | Olkiluoto 2 -laitosyksikkö |
| OL3 | Olkiluoto 3 -laitosyksikkö |
| PAUT | engl. <i>phased array ultrasonic testing</i> , vaiheistettu ultraäänitarkastus |
| PHWR | engl. <i>pressurized heavy water reactor</i> , raskasvesijäähdytteinen reaktori |
| ppb | engl. <i>parts per billion</i> , tilavuuden miljardisosa |
| ppm | engl. <i>parts per million</i> , tilavuuden miljoonasosa |
| PWR | engl. <i>pressurized water reactor</i> , painevesireaktori |

| | |
|-------|--|
| PWSCC | engl. <i>primary water stress corrosion cracking</i> , primääriveden jännityskorroosio |
| RPV | engl. <i>reactor pressure vessel</i> , reaktoripaineastia |
| SCC | engl. <i>stress corrosion cracking</i> , jännityskorroosio |
| SHE | engl. <i>standard hydrogen electrode</i> , standardivetyelektrodi |
| SMAW | engl. <i>shielded metal arc welding</i> , puikkohitsaus |
| STUK | Säteilyturvakeskus |
| TGSCC | engl. <i>transgranular stress corrosion cracking</i> , rakeen läpi etenevä jännityskorroosio |
| TVO | Teollisuuden Voima Oyj |
| UT | engl. <i>ultrasonic inspection</i> , ultraäänitarkastus |
| VTT | Teknologian tutkimuskeskus |
| WRS | engl. <i>welding residual stress</i> , hitsausjäännös jännitykset |
| YK | Yhdistyneet kansakunnat |
| YVL | Ydinturvallisuusohje |

Symbolit

| | |
|------------|--|
| D_i | putken sisäkehän halkaisija (mm) |
| D_o | putken ulkokehän halkaisija (mm) |
| d_o | putken ulkokehän halkaisija (mm) |
| e | putken seinämän paksuus (mm) |
| f | kehäjännitys (MPa) |
| i | jännitysintensiiteettikerroin |
| M_A | jatkuvista mekaanisista kuormista aiheutuva momentti (Nmm) |
| M_C | lämpölaajenemisesta ja vaihtokuormituksesta aiheutuva momentti (Nmm) |
| p_c | laskentapaine (MPa) (N/mm ²) |
| z | liitoksen lujuuskerroin |
| Z | putken taivutusvastus (mm ³) |
| σ_4 | aksiaalinen jännitys (MPa) |

1 Johdanto

Jännityskorroosio (engl. *stress corrosion cracking*, SCC) on materiaalin vaurioitumismekanismi, joka syntyy, kun jännityskorroosioaltis materiaali altistuu korroosiolle altistavalle ympäristölle ja tarpeeksi suurille vetojännityksille [1]. Vaikuttavat olosuhteet altistavat materiaalin jännityskorroosiolle, jolloin se murtuu. Materiaalien altistumiseen ilmiölle vaikuttaa samaan aikaan monta eri tekijää ja siksi säröilyn ennustaminen on vaikeaa.

Materiaalit altistuvat ydinvoimaloissa rankoille olosuhteille, jotka aiheuttavat ikääntymisilmiöitä. Jännityskorroosiota havaittiin ensimmäisen kerran ydinvoimalaitoksilla jo 1950-luvulla [2]. Jännityskorroosion aiheuttama säröily on merkittävä ongelma useilla eri kiehutus- ja painevesilaitoksilla. Se ei myöskään rajoitu vain yksittäiseen komponenttiin, vaan esiintyy laitosten useissa hitseissä, joissa on hyödynnetty jännityskorroosiolle alttiita materiaaleja [3]. Ongelma esiintyy vanhemman sukupolven laitoksilla, mutta ei uudemman sukupolven laitoksilla, kuten Olkiluoto 3, joissa on käytetty eri materiaaleja. Jännityskorroosio kehittyi joissain laitosten komponenteissa jo kuukausien kuluessa laitoksen käyttöönotosta ja jotkut ongelmat ovat ilmenneet vasta vuosien kuluttua [2]. Ydinvoimalaitoksia halutaan hyödyntää mahdollisimman pitkään ja niiden käyttöikä siis pidentää. Materiaalien ikääntyminen ja vaurioituminen, muun muassa jännityskorroosion vaikutuksesta, vaikeuttaa tätä. Materiaalien jäljellä olevaa käyttöikää ja vaurioiden vakavuutta on vaikeaa arvioida, koska niiden kestävyysvaikutavat mekaaniset, metallurgiset ja sähkökemialliset tekijät [3–5].

Jännityskorroosio on huomioitu Teollisuuden voima Oyj:n (TVO) laitosten rakentamisessa, koska muilla laitoksilla ongelmia oli havaittu jo ennen tätä. Tietämys ei kuitenkaan ollut laitosten rakentamisvaiheessa vielä kattavaa, ja ongelmia ei ole onnistuttu välttämään TVO:n Olkiluoto 1 ja 2 -laitoksilla. TVO:n laitoksilla jännityskorroosiota on esiintynyt muun muassa 312 syöttövesi-, 321 puhdistus/jäähdytys- sekä 323 sydämenruiskutusjärjestelmien reaktoripaineastian läpivientien Inconel 182 -hitseissä. Nämä läpiviennit ovat tärkeitä reaktorin toiminnan ja turvallisuuden kannalta, joten mahdollisen jännityskorroosiosärön aiheuttama vuoto on ongelma, jolta halutaan välttyä. Kyseisten läpivientien Inconel 182 -materiaalin jännityskorroosiota käsitellään tässä työssä.

Työn tarkoituksena on esitellä ongelma, sen taustat ja tehdä tilannekatsaus siitä, mitä aiheesta jo tiedetään. Työ käsittelee ensisijaisesti kiehutusvesilaitoksilla esiintyvää jännityskorroosiota, mutta ongelma esiintyy myös painevesilaitoksilla, joissa on käytetty samoja materiaaleja.

TVO:lta löytyvät asiakirjat läpivientien jännityskorroosiosta taulukoidaan Liitteeseen 1, jotta yrityksen sisäinen tiedonhallinta olisi selkeämpää aiheeseen liittyen. Tämän lisäksi näistä ja muista julkisista löytyvistä lähteistä koostetaan kirjallisuuskatsaus. Sen tarkoituksena on käsitellä muun muassa sitä, mihin tutkimus on kehittynyt vuosien saatossa, mitkä tekijät vaikuttavat ilmiön syntyyn, miten säröilyn etenemistä seurataan ja millaisia mitigointimenetelmiä on.

Jännityskorroosio voi johtaa seurauksiin, jotka vaikuttavat laitoksen turvallisuuteen ja käytettävyyteen. Varautuminen ennalta jännityskorroosion esiintymiseen on kannattavaa, jotta vauriot eivät pääse yllättämään ja niiden korjaamiseksi on valmiit suunnitelmat. Näin ongelman ratkaiseminen ei vie kohtuuttoman paljon aikaa sen jälkeen, kun särö on havaittu.

Työn tekemisen apuna on hyödynnetty tekoälytyökaluja lähdemateriaalien etsimisessä ja kääntämisessä.

2 Ydinvoima

Ydinenergiatuotanto perustuu atomiytimien, useimmiten uraanin, hallittuun halkaisemiseen, eli fission. Fissioreaktiossa neutroni osuu raskaaseen atomiytimeen ja ydin halkeaa tuottaen lisää neutroneja, fissiotuotteita ja paljon lämpöä. Uudet neutronit törmäävät jälleen uusiin atomiytimiin ja syntyy ketjureaktio. Syntyneen lämpöenergian avulla tuotetaan kuumaa höyryä, joka pyörittää turbiineja ja niihin kytkettyä generaattorin roottoria, joka tuottaa sähköä. Fissioreaktio havaittiin vuonna 1939 [6]. Tuolloin sitä haluttiin hyödyntää ensisijaisesti aseena ja vasta myöhemmin sitä alettiin hyödyntää sähköntuotantomuotona.

Fissioreaktion etu on se, että se ei tuota hiilidioksidipäästöjä. Ydinvoiman aiheuttamat muut päästöt ovat myös kohtalaisen pieniä verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin. Ydinenergian tuotanto on vakaata ja siksi tärkeä energiamuoto sääolosuhteista riippuvaisten uusiutuvien energianlähteiden, kuten tuuli- ja aurinkovoiman, rinnalla. Ydinvoima on tällä hetkellä merkittävä energiantuotantomuoto ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Ydinvoima ei ole kuitenkaan ongelmattonta, koska siihen liittyy merkittäviä turvallisuusriskejä, kuten riski ydinonnettomuuksille. Sähköntuotannon ohessa myös syntyy ydinjätettä eli radioaktiivista materiaalia, joka säteilee terveydelle vaarallista säteilyä tuhansien vuosien ajan. Ydinjätteen jatkokäsittely tulee siksi suunnitella tarkasti. Jätteitä ei voida vain hävittää, vaan ne tulee eristää elinympäristöstä [7]. Olkiluodon ydinjätteet loppusijoitetaan Posivan ONKALO:on, jossa polttoaineen loppusijoitus aloitetaan ensimmäisenä koko maailmassa [8]. Ydinvoiman käyttö vaatii tarkkaa suunnittelua ja valvontaa koskien sekä energiantuotantoprosessia että jätteidenkäsittelyä.

2.1 Teollisuuden Voima Oyj

Teollisuuden Voima Oyj on suomalainen ydinvoimayhtiö, joka rakentaa ja hallinnoi voimalaitoksia ja voimansiirtolaitteita [9]. Yhtiöllä on suuri rooli Suomen sähköntuotannossa. TVO:lla on kolme laitosyksikköä Olkiluodon ydinvoimalaitosalueella Eurajoella, ja ne tuottivat noin neljäsosan Suomessa tuotetusta sähköstä vuonna 2025 [10].

Olkiluoto 1 (OL1) ja Olkiluoto 2 (OL2) ovat identtisiä laitoksia ja ne on varustettu kiehumisvesireaktorilla (engl. *boiling water reactor*, BWR). Olkiluoto 1 -laitosyksikkö on aloittanut sähköntuotantonsa sähköverkkoon vuonna 1978 ja Olkiluoto 2 -laitosyksikkö vuonna 1980 [11]. Laitokset toimitti ruotsalainen AB Asea Atom [12]. Laitosten alkuperäinen suunniteltu käyttöikä oli 40 vuotta eli vuoteen 2018 asti, mutta niiden käyttölupaa on tällä

hetkellä pidennetty vuoden 2038 loppuun asti [13]. Yhtiö yrittää hakea käyttö lupaa vielä vuoden 2048 tai 2058 loppuun asti [14]. Kummankin laitoksen sähkötehoa on nostettu alkuperäisestä 660 megawattista nykyiseen 890 megawattiin eli yhteensä laitosten sähköteho on 1780 megawattia [12, 15]. Olkiluodon kolmas laitosyksikkö, Olkiluoto 3 (OL3) aloitti sähköntuotannon vuoden 2023 alussa. Se on varustettu eurooppalaisella painevesireaktorilla (engl. *European pressurized reactor*, EPR) [16]. OL3 rakentamisen alkaessa maailmassa ei ollut vielä yhtäkään toista EPR-laitosta rakenteilla tai käytössä [17]. Laitoksen toimitti AREVA NP:n ja Siemensin konsortio [18]. Eurooppalainen painevesilaitos on kolmannen sukupolven painevesilaitos, jonka turvallisuutta ja tehokkuutta on parannettu verrattuna perinteisellä painevesireaktorilla (engl. *pressurized water reactor*, PWR) varustettuun laitokseen [19]. OL3-laitoksen nykyinen sähköteho nettona on 1600 MW [16]. Olkiluoto 3 on tällä hetkellä Euroopan tehokkain ydinvoimalaitosyksikkö [16]. Taulukossa 1 on vertailtu Olkiluodon laitosyksikköiden teknisiä tietoja.

Taulukko 1. TVO:n laitosyksikköiden tekniset tiedot. Muokattu lähteistä [15, 18].

| | Olkiluoto 1 / Olkiluoto 2 | Olkiluoto 3 |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| Sähköteho (netto) | 890 MW | 1600 MW |
| Reaktorin lämpöteho | 2500 MW | 4300 MW |
| Kokonaishyötysuhde | > 35 % | ~ 37 % |
| Reaktorityyppi | BWR | PWR, EPR |
| Toimittaja | AB Asea Atom | Areva NP, Siemens |
| Reaktorin käyttöpaine | 70 bar | 155 bar |
| Reaktorin käyttölämpötila | 286 °C | 312 °C |

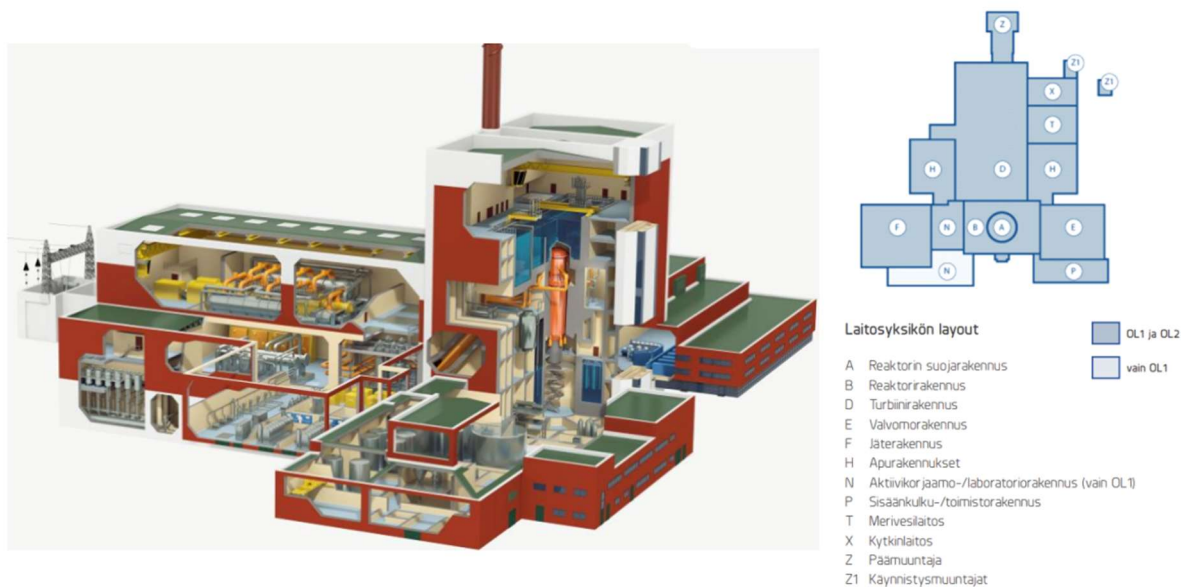
2.2 Yleisimmät ydinvoimalaitostyypit

Useimmat reaktorityypit tuottavat energiaa fissiona syntyvän lämmön avulla. Lämpö saa veden höyrystymään, höyry pyörittää turbiinia ja turbiiniin kytketty generaattori muuntaa liikkeen sähköksi. Eri reaktorityypit voivat erota toisistaan esimerkiksi rakenteeltaan, tehokkuudeltaan, jäähdytin- ja hidastinaineeltaan sekä polttoaineeltaan [20]. Olkiluodossa käytössä olevat reaktorityypit painevesireaktori ja kiehumusvesireaktori ovat yleisimmät reaktorityypit maailmassa [21]. Eri reaktorityyppejä on vertailtu Taulukossa 2.

Taulukko 2. Käytössä olevat reaktorityypit. Kaikkien verkkoon kytkettyjen ydinreaktorityyppien maailmanlaajuinen kappalemäärä ja sähköteho vuonna 2025 sekä reaktoreiden hyödyntämät poltto-, jäähdytin- ja hidastinaineet. Muokattu lähteestä [20].

| Reaktorityyppi | Määrä (kpl) | Sähköteho GWe | Polttoaine | Jäähdytin | Hidastin |
|--|-------------|---------------|---|---------------------|-------------|
| Painevesireaktori (PWR) | 310 | 298,4 | Väkevöity UO ₂ | vesi | vesi |
| Kiehumusvesireaktori (BWR) | 60 | 61,0 | Väkevöity UO ₂ | vesi | vesi |
| Raskasvesijäähdytteinen reaktori (PHWR) | 47 | 24,5 | UO ₂ | raskas vesi | raskas vesi |
| Kaasujäähdytteinen reaktori (AGR) | 8 | 4,7 | Luonnon-uraani, väkevöity UO ₂ | CO ₂ | grafiitti |
| Kevytvesijäähdytteinen grafiittimoderoitu reaktori (LWGR) | 10 | 6,5 | väkevöity UO ₂ | vesi | grafiitti |
| Nopea neutronireaktori (FNR) | 2 | 1,4 | PuO ₂ ja UO ₂ | nestemäinen natrium | - |
| Korkean lämpötilan kaasujäähdytteinen reaktori (HTGR) | 1 | 0,2 | väkevöity UO | helium | grafiitti |

Kiehumusvesireaktori ja painevesireaktori ovat kevytvesireaktoreita. Kevytvesireaktorit käyttävät jäähdytteenään ja hidasteenaan puhdistettua ja suolatonta vettä [22]. Kiehumus- ja painevesilaitoksen toiminta eroaa toisistaan merkittävästi, sillä kiehumusvesilaitoksella lämmönsiirtoon on yksi piiri ja vesi höyrystyy jo reaktoripaineastiassa. Painevesilaitoksella puolestaan lämmönsiirtoon käytetään kahta erillistä piiriä ja vesi höyrystyy reaktoripaineastian ulkopuolella. Kiehumus- ja painevesilaitos koostuvat molemmat reaktori-, turbiini- sekä tuki- ja apurakennuksista. Reaktorirakennuksessa olevassa reaktoripaineastiassa tapahtuu lämmöntuotanto fissioreaktiolla. Kuvassa 1 näkyy OL1- ja OL2-laitosten poikkileikkaus ja pohjapiirros.



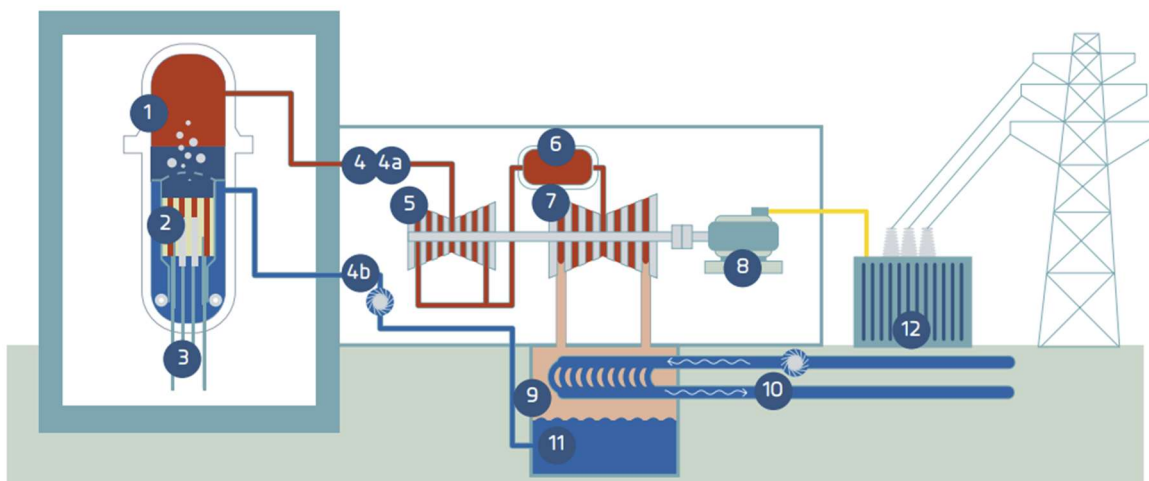
Kuva 1. OL1- ja OL2-laitosten poikkileikkaus ja pohjapiirros. Laitos koostuu reaktori-, turbiini- sekä tuki- ja apurakennuksista. Kuva: TVO [23].

2.2.1 Kiehumusvesilaitoksen toimintaperiaate

Kuvassa 2 on esitetty kiehumusvesilaitoksen prosessikaavio. Reaktoripaineastian sydämessä sijaitsevilla polttoainepipissa fissioreaktio saa niput kuumenemaan. Jäähdytteenä toimiva vesi kulkee kuumenneiden polttoainepipujen lävitse, jolloin lämpö siirtyy veteen ja osa vedestä höyrystyy. Reaktoripaineastiassa tapahtuvan reaktion tehoa säädetään säätösauvoilla. Säätösauvat sisältävät neutroneja absorboivaa ainetta, kuten booria, mikä heikentää fissioketjureaktiota tai tarvittaessa pysäyttää sen kokonaan. Höyrystyneen veden kosteutta alennetaan ennen kuin se voidaan johtaa turbiinilaitokselle. Se tapahtuu reaktorissa sijaitsevilla höyrynerottimissa ja -kuivaimissa. Lähes kaikki höyryssä jäljellä olleet nestemäiset vesimolekyylit saadaan erotettua kaasumaisessa tilassa olevista vesimolekyyleistä [12]. Liian kostean höyryn hyödyntäminen johtaisi laitoksen hyötysuhteen alenemiseen ja korroosioon turbiinilavoissa [24]. Kun höyry on kuivattu, se johdetaan päähöyryputkia pitkin turbiinilaitoksen korkeapaineturbiinille, jossa se luovuttaa osan energiastaan ja saa turbiinin pyörimään. Korkeapaineturbiinilta höyry kulkee alivirtausputkia pitkin välitulistimille. Välitulistimilla höyry kuivataan kosteudenerottimilla ja tulistetaan. Sieltä höyry jatkaa matkaansa ylivirtausputkia pitkin matalapaineturbiineille, jossa se luovuttaa energiaa. Turbiinien liike pyörittää generaattorin roottoria ja liike muunnetaan sähköksi [12].

Kun höyry on luovuttanut energiansa, se lauhdutetaan takaisin nesteeksi. Lauhdutinputket on jäähdytetty merivedellä, mikä saa höyryn lauhtumaan. Syntynyt lauhde täytyy käsitellä ennen

kuin se voidaan johtaa takaisin reaktoriin. Se pumpataan lauhteen puhdistusjärjestelmän ja matalapaine-esilämmittimien kautta syöttövesipumpuille, jolloin siitä tulee syöttövettä. Pumput korottavat veden painetta ja pumpaavat syöttöveden korkeapaine-esilämmittimille, jossa sitä lämmitetään lisää. Lopulta vesi johdetaan takaisin reaktoriin. [12]



- | | | |
|-----------------------|---------------------------|-------------------|
| 1. Reaktori | 4b. Syöttövesi reaktoriin | 9. Lauhdutin |
| 2. Sydän | 5. Korkeapaineturbiini | 10. Merivesipiiri |
| 3. Säätosauvat | 6. Välitulistin | 11. Lauhde |
| 4. Primääripiiri | 7. Matalapaineturbiini | 12. Muuntaja |
| 4a. Höyry turbiinille | 8. Generaattori | |

Kuva 2. Kiehausvesilaitoksen toimintaperiaate. Vesi etenee kiehausvesilaitoksella yhdessä piirissä. Kuva: TVO [25].

Reaktoripaineastian yhteydet altistuvat haastaville olosuhteille, jotka vaikuttavat niiden kestävyys- ja käyttöikänsä. Kiehausvesilaitoksella jännityskorroosiota on esiintynyt austeniittisestä ruostumattomasta teräksestä sekä nikkelipohjaisista seoksista valmistetuissa putkissa ja muissa komponenteissa [3].

2.2.2 Painevesilaitoksen toimintaperiaate

Painevesireaktorissa vesi kiertää kahdessa erillisessä piirissä ja vesi höyrystyy vasta sekundääripiirissä toisin kuin kiehausvesilaitoksella, jossa on vain yksi piiri vedelle. Reaktoripaineastiassa jäähdyte eli primääripiirin vesi virtaa sydämen läpi, jolloin fissiona syntynyt lämpö siirtyy veteen. Paineistin ylläpitää reaktoripaineastian sisällä riittävän korkean paineen, jotta jäähdyte ei kiehu ja höyrysty. Jäähdytysveden boorilla ja säätosauvoilla säädelään reaktorin reaktiivisuutta ja tehoa. Reaktorissa lämmennyt jäähdyte virtaa höyrystimen putkiin ja luovuttaa lämpöään sekundääripiirin syöttövedelle, joka virtaa

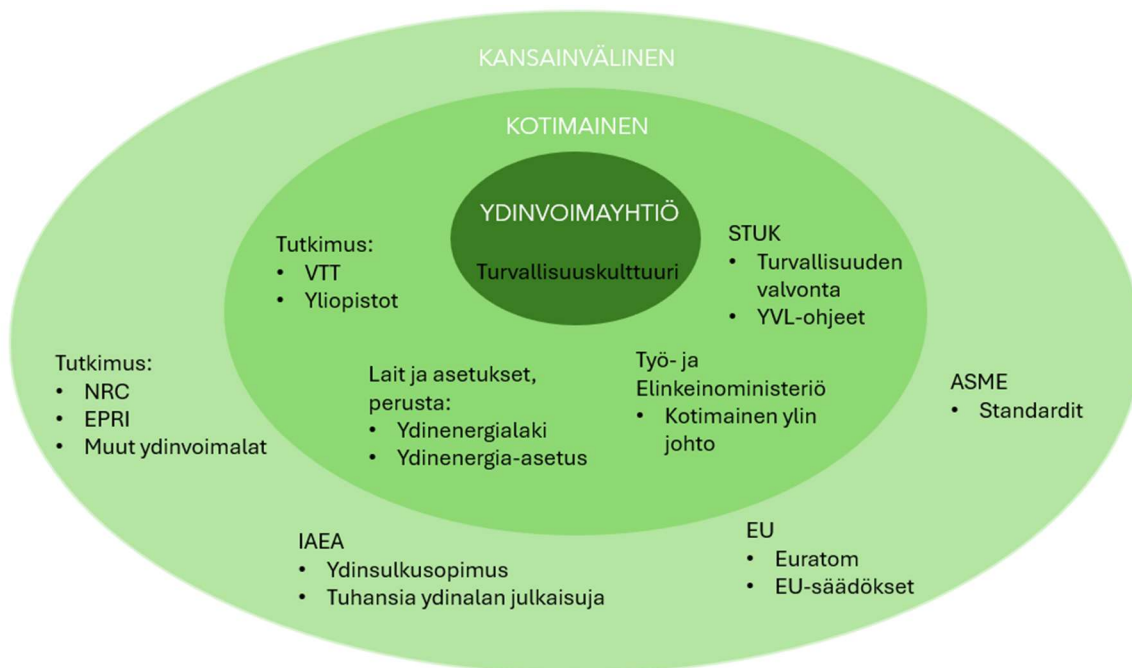
höyrystimien putkien ympärillä. Primääripiirin radioaktiivinen vesi ei pääse sekoittumaan sekundääripiirin veteen, koska ne ovat eristetty toisistaan. Kun lämpöä on siirtynyt riittävästi, syöttövesi alkaa kiehua, koska sekundääripiirin paine on huomattavasti alempi kuin primääripiirin. [26]

Myös painevesilaitoksella reaktorin yhteydet altistuvat vaihteleville olosuhteille, jotka vaikuttavat niiden kestävyteen ja käyttöikänsä. Painevesireaktorin primäärivedessä esiintyvä jännityskorroosio (engl. *primary water stress corrosion cracking*, PWSCC) on jännityskorroosiota, joka syntyy hapettomassa korkealämpöisessä vedessä [27]. Vanhemman sukupolven painevesilaitoksilla on käytetty samoja materiaaleja kuin vanhemman sukupolven kiehutusvesilaitoksilla [17]. Nikkelipohjainen Inconel 182 on aiheuttanut jännityskorroosiosäröjä myös painevesilaitoksilla, joissa vesikemia eroaa kiehutusvesilaitoksen vesikemiasta. Uudemman sukupolvenlaitoksilla, kuten Olkiluoto 3 -laitoksella, käytetyt materiaalit on valittu huomioiden aikaisemmin ilmenneet ongelmat [17]. Jännityskorroosiota ei esiinny näissä uusissa materiaaleissa.

2.3 Ydinvoiman turvallisuuden tahot

Ydinvoiman turvallisen käytön varmistamiseksi monet eri tahot osallistuvat siihen (Kuva 3). Ydinenergian käyttöä valvotaan ja ohjataan tarkasti koko sen elinkaaren ajan. Vaikka ydinvoima on keino tuottaa sähköä tehokkaasti ja vähäpäästöisesti, siihen liittyy vaarallisia riskejä, jos toimintaa ei ohjata ja seurata. Negatiiviset vaikutukset ovat vältettävissä säännöksillä sekä eri tahojen yhteistyöllä. Jo pienetkin vauriot komponenteissa voivat johtaa vakaviin seurauksiin, joten toiminnan tulee olla hyvin valvottua ja ohjattua, jotta ydinvoimalaitoksia osataan käyttää turvallisesti. Reaktoripaineastian yhteyden säröily voi johtaa vuotoihin, joten säröjen ennaltaehkäisemiseksi ja korjaamiseksi on tehty paljon työtä ja tutkimusta eri tahojen toimesta.

TVO:n oman turvallisuuden valvonnan lisäksi useampi eri taho valvoo turvallisuuden toteutumista. Kotimaisessa lainsäädännössä huomioidaan kansainväliset sopimukset ja säädökset. Kuvassa 3 on eritelty ydinvoimatoiminnan eri tahoja ja niiltä tulevia ohjeita ja säädöksiä. Erilaiset lait, suositukset ja tahot varmistavat, että ydinvoiman vahingolliset vaikutukset karsitaan ja toiminta säilyy turvallisena. Tahojen välinen yhteistyö säästää resursseja ja on usein kaikkien etujen mukaista.



Kuva 3. Suomalainen ydinvoimayhtiö ja siihen vaikuttavat kotimaiset ja kansainväliset toimijat sekä ohjeet. Ydinvoimayhtiöön vaikuttavat lukuisat eri toimijat ja ohjeet, joita sen tulee noudattaa.

2.3.1 Suomen ydinvoiman käyttöön vaikuttavat kansainväliset tahot

Kansainvälinen yhteistyö auttaa pienentämään onnettomuuksien riskiä ja levittämään hyviä menettelytapoja ydinvoima-alan toimijalta toiselle. Kansainväliset järjestöt ja sopimukset edistävät ydinvoiman rauhanomaista käyttöä samalla jakaen osaamista tekijältä toiselle esimerkiksi tutkimusten ja käyttökokemusten muodossa.

Yhdistyneiden kansakuntien (YK) alainen järjestö Kansainvälinen atomienergiajärjestö (engl. *International Atomic Energy Agency*, IAEA) perustettiin edistämään ydinenergian rauhanomaista käyttöä ja vastaamaan ydinaseiden leviämiseen liittyviin huoliin [6]. IAEA:n jäsenvaltiot ovat sitoutuneet noudattamaan ydinsulkusopimusta, jonka tavoitteena on maailmanlaajuisesti estää ydinaseiden leviäminen, edistää ydinvoiman rauhanomaista käyttöä sekä ydinaseriisunta samalla mahdollistaen rauhanomaisiin tarkoituksiin olevan ydinteknologian viennin [28]. Suomessa IAEA valvoo ydinmateriaalien käyttöä sekä itsenäisesti että apunaan Euroopan komissio ja Säteilyturvakeskus (STUK) [28]. IAEA julkaisee suuren määrän ydinalan dokumentteja, joihin sisältyy esimerkiksi teknisiä oppaita, tutkimusten raportteja, turvallisuusstandardeja ja konferenssijulkaisuja [29].

Euroopan unionin (EU) jäsenet ovat sitoutuneet Euratom-sopimukseen, jonka tarkoituksena on mahdollistaa ydinenergian tuotanto sen jäsenmaissa. Euratom eli Euroopan

atomienergiayhteisö valvoo, että EU:n jäsenvaltiot noudattavat sopimusvelvoitteita ydinvoiman rauhanomaisesta käytöstä. [28]

Monet yhdysvaltalaiset tahot edistävät ydinenergian turvallista käyttöä. Nuclear Regulatory Commission (NRC) tekee riippumatonta tutkimusta ydinreaktorin turvallisuudesta esimerkiksi kartoittamalla turvallisuusriskejä ja tekemällä käyttökokemusanalyysyjä [30]. Electric Power Research Institute (EPRI) on tutkimuskeskus, joka työskentelee yhdessä erilaisten yritysten kanssa tutkimuksen edistämiseksi. Sen tavoitteena on tehdä tutkimusta, joka edistää turvallisen, edullisen ja puhtaan sähkön tuottamista ja jakelua. [31] Teollistumisen myötä kaivattiin yhteistyön laajentamista tekniikan alan tekijöiden välillä. Tämän takia perustettiin American Society of Mechanical Engineers (ASME) -järjestö. Se on toiminut jo vuodesta 1880 alkaen ja on merkittävä tekniikan alan toimijoiden yhteistyötä, kommunikaatiota ja standardointia edistävä ammattijärjestö [32]. Monet ydinvoimalaitoksien suunnittelua, rakentamista, käyttämistä, kunnossapitoa ja turvallisuustarkastuksia koskevat käytänteet perustuvat ASME-standardeihin [33]. ASME kehittää laajasti erilaisia teknisiä standardeja muun muassa turvallisuuden parantamiseksi ja luotettavuuden lisäämiseksi [32]. ASME on tärkein ydinlaitteita koskeva standardointijärjestelmä.

2.3.2 Ydinvoiman käyttö ja sen turvallisuuden valvonta Suomessa

Suomen ydinenergiainsäädäntö on vahvasti sidoksissa kansainvälisiin sopimuksiin ja suosituksiin. Suomen ydinenergiainsäädäntö täyttää kansainväliset velvoitteet, joita se on sitoutunut noudattamaan [34]. Näitä velvoitteita antavat esimerkiksi viime kappaleessa käsitellyt IAEA sekä Euroopan unioni.

Työ- ja elinkeinoministeriö vastaa Suomen ydinenergian ylimmästä johtamisesta ja valvonnasta. Se esimerkiksi valmistelee lupapäätökset ydinvoimalaitosten rakentamisesta ja käytöstä Suomessa, ohjaa ydinjätehuoltoa, edustaa Suomea kansainvälisissä ydinenergiajärjestöissä sekä valvoo kansainvälisten sopimusten toteutumista [35].

Ydinenergian käyttö vaatii lainsäädäntöä. Ydinenergi laki (990/1987) ja ydinenergia-asetus (161/1988) säätelevät ydinenergian käyttöä Suomessa ja muodostavat perustan sen turvalliselle käytölle [34]. Ydinenergi laki asettaa säädöksiä koskien ydinenergian käyttöä, ydinaineita ja ydinjätteitä sekä uraanin tai toriumin tuottamiseen liittyvää kaivos- ja malminrikastustoimintaa [36]. Ydinvoimayhtiö eli luvanhaltija noudattaa ydinenergi laissa säädettyjä kohtia, jotta se voi harjoittaa toimintaansa [37].

Ydinenergiain mukaan Säteilyturvakeskuksen (STUK) tehtävänä on ydinenergian käytön turvallisuuden valvonta Suomessa [38]. STUK valvoo hyvin kokonaisvaltaisesti ydin- ja säteilyturvallisuutta ja ohjaa ydinvoiman turvallisuuskulttuurin kehittymistä Suomessa [38]. STUK raportoi ydinenergian käytön viranomaisvalvonnasta ja sen tuloksista vuosittain työ- ja elinkeinoministeriölle [39]. Ydinturvallisuusohjeet eli YVL-ohjeet ovat yksityiskohtaiset turvallisuusvaatimukset, jotka STUK julkaisee ydinenergiain asettamana [37]. YVL-ohjeet koostuvat viidestä eri osa-alueesta:

- A: Ydinlaitoksen turvallisuuden hallinta
- B: Ydinlaitoksen ja sen järjestelmien suunnittelu
- C: Ydinlaitoksen ja ympäristön säteilyturvallisuus
- D: Ydinmateriaalit ja -jätteet
- E: Ydinlaitoksen rakenteet ja laitteet

Luvanhaltijan on velvollisuus noudattaa annettuja ohjeita, mutta se voi myös esittää oman menettelytapansa, joka toteuttaa lain vaatiman turvallisuustason, ja STUK voi hyväksyä poikkeavan menettelytavan [37].

STUK vaatii ydinvoimaloiden suunnittelussa, rakentamisessa ja käytössä kehittyneen turvallisuuskulttuurin ylläpitoa. Turvallisuuskulttuuri on olemukseltaan sitä, että on kyky ja tahto ymmärtää miten toimia turvallisesti sekä kyky ja tahto huomioida mahdolliset vaarat ja niiden ennaltaehkäisykeinot ja toimia näiden periaatteiden pohjalta. Turvallisuuskulttuuri ei ole vain organisaation johtajien vastuulla, vaan jokaisen yksilön osallistuminen ja sitoutuminen noudattamaan turvallisia menettelytapoja on tärkeää. Koska ydinvoiman käyttö sisältää huomattavia turvallisuusriskejä, ydinvoimalat ovat turvallisuuskriittisiä organisaatioita. [40] TVO:n kokonaisturvallisuuden tilaa arvioidaan tuotannon, turvallisuuden, eliniän hallinnan johtamisen, organisaation ja henkilöstön näkökulmista [41]. TVO:n ja muiden ydinvoimalaitosten hallinnoijien tulee toiminnassaan noudattaa kansallisia ja kansainvälisiä ohjeita ja velvoitteita, jotta ne voivat turvallisesti jatkaa toimintaansa.

Hyvän ja toimivan turvallisuuskulttuurin eteen työskennellään eri keinoin. Näitä keinoja voivat olla esimerkiksi turvallisuuskoulutukset, työilmapiirin parantaminen, selkeät ja yksityiskohtaiset työsuunnitelmat, töiden dokumentointi, palautteen antaminen ja saaminen, työympäristöstä huolehtiminen, ongelmien ja puutteiden raportointi sekä johdon hyvä esimerkki työntekijöille [40]. Turvallisuuskulttuurin huomioiminen osana jokaista työpäivää jokaisessa työtehtävässä on tärkeää [41]. Turvallisuuskulttuuria noudattaessa vahingoilta ja

onnettomuuksilta voidaan välttyä paljon suuremmalla todennäköisyydellä kuin turvallisuuskulttuuria laiminlyödessä.

Työssä käsiteltävien jännityskorroosioalttiiden yhteiden parissa työskentelee useampia henkilöitä ja heillä on vastuu varmistaa, että eri tahoilta tulleita vaatimuksia noudatetaan. Yhteille tehdään muun muassa vaatimusten mukaisia tarkastuksia ja korjauksia. Nämä vaatimukset liittyvät esimerkiksi rakenteessa olevien vaurioiden sallittuun kokoon ja yhteille tehtäviin hitsauspinnoitekorjauksiin. Jos näissä tehtävissä ei noudateta turvallisuuskulttuurin mukaisia periaatteita, turvallisuutta ja eri tahoilta tulleita vaatimuksia voidaan mahdollisesti laiminlyödä. Jännityskorroosio on potentiaalisesti merkittävä ongelma ydinvoimalaitoksilla, eikä turvallisuuskulttuurin laiminlyömiselle ole siksi tilaa.

2.3.3 Eri tahojen merkitys jännityskorroosion hallinnassa

Kaikki esitellyt ja myös monet muut osapuolet vaikuttavat jännityskorroosio-ongelman ratkaisemiseen ja torjumiseen. Eri kansainväliset toimijat, tutkimusorganisaatiot, yliopistot, ydinvoiman käyttäjät ja muut alan kehittäjät muodostavat verkoston, jossa osaamista ja kokemuksia voidaan jakaa. Ydinvoimalat tekevät usein yhteistyötä ja jakavat kokemuksiaan ja osaamistaan yli valtiorajojen. TVO on solminut yhteistyösopimuksen Westinghouse Electric Companyn ja ruotsalaisen OKG-ydinvoimayrityksen kanssa [42]. Sopimuksen avulla ne voivat yhteistyössä kartoittaa ja ratkaista ongelmia ja siten mahdollisesti hyödyntää niiden kiehutusvesireaktoreita mahdollisimman tehokkaasti ja pitkään. Yhteistyö mahdollistaa osaamisen jakamisen, kehittämisen ja ylläpitämisen sekä tukee henkilöstöressurssien optimointia [42]. Koska jännityskorroosiota esiintyy useilla laitoksilla, eri tahojen välinen yhteistyö helpottaa ongelman selvittämistä huomattavasti.

Jännityskorroosio huomioidaan Säteilyturvakeskuksen YVL A- ja E-ohjeissa osana laitoksen ikääntymis- [27] ja vaurioitumismekanismeja [43]. Ohjeessa YVL A.8 "Ydinlaitoksen ikääntymisen hallinta" käsitellään järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden ikääntymiseen varautumista. Jännityskorroosio huomioidaan siinä tyypillisenä ikääntymismekanismina ydinvoimalaitoksilla. Ohjeessa YVL E.5 "Ydinlaitoksen painelaitteiden rikkomattomat määräaikaistarkastukset" käsitellään määräaikaistarkastusten (engl. *in-service inspection*, ISI) toteutusta [43]. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI -standardia hyödynnetään määräaikaistarkastusten perusvaatimustasona ja IAEA:n turvallisuusohjeessa "IAEA Safety Standards Series No. NS-G-2.6, Maintenance, Surveillance and In-Service Inspection in Nuclear Power Plants" annetaan täydentäviä ohjeita määräaikaistarkastuksista [43].

Määräaikaistarkastusten tarkoituksena on havaita mahdolliset vauriot ennen kuin ne vaarantavat turvallisuuden [43]. Siksi määräaikaistarkastukset ovat erittäin tärkeitä jännityskorroosion aiheuttamien ongelmien välttämiseksi. ASME Section II käsittelee materiaaleja ja Section III lujuustekniikkaa.

Euroopan unioni osallistuu jännityskorroosion aiheuttamien ongelmien kontrollointiin esimerkiksi osallistumalla kansainväliseen yhteistyöhön ja rahoittamalla tutkimuksia jännityskorroosioon liittyen [44]. NRC ja EPRI tekevät yhteistyötä monissa eri ydinturvallisuutta edistävissä tutkimuksissa ja ne ovat solmineet sopimuksen esimerkiksi painevesireaktorin jännityskorroosio-ongelman tutkimisesta yhteistyössä. Kyseisessä tutkimuksessa analysoidaan laitoksella käytettäviä materiaaleja Inconel 600/182/82 sekä Inconel 690/152/52. [45]

2.4 Jännityskorroosion vaikutukset ydinvoimalassa

Jännityskorroosiosäröytyminen voi johtaa vakaviin ongelmiin, jotka vaikuttavat laitoksen turvallisuuteen, käytettävyyteen ja taloudelliseen kannattavuuteen. Oskarshamn 3 -laitos on Ruotsissa sijaitseva saman tyyppin kiehutusvesilaitos kuin OL1 ja OL2, ja laitosten yhteissä on hyödynnetty samoja materiaaleja. Kaikkien näiden laitosten reaktoripaineastian yhteydet ovat siis jännityskorroosiolle alttiita.

Oskarshamn 3:n tuotanto keskeytettiin vuoden 2025 maaliskuussa vuosihuollon alkaessa. Vuosihuoltojen yhteydessä havaittiin, että putkeen oli syntynyt särö [46]. Hitsin korjaukset osoittautuivat odotettua vaativammiksi, jolloin ne venyivät ja laitos oli poissa käytöstä seitsemän kuukauden ajan. Myöhemmin kerrottiin, että hitsausliitoksessa oleva särö vuosi vettä 0,2 kg sekunnissa. Korjaustyö hoidettiin siihen kehitetyillä kuudella eri robotilla, joilla oli kaikilla oma tehtävävaiheensa särökohdan korjaamiseksi. [47] Oskarshamn 3 on Ruotsin suurin ydinvoimalaitos ja sen käytettävyydellä on merkittävät vaikutukset Ruotsin sähkömarkkinoihin. Tuotannon pysähtymisen taloudelliset vaikutukset olivat suuret. Arvioitiin, että tuotanto pieneni noin 7,5 terawattituntia keskeytyksen takia ja tämän seurauksena rahallinen tappio yhtiölle olisi ollut arviolta noin 3,3 miljardia ruotsin kruunua [47]. Laitteistokustannuksista TVO:lla ei ole tietoa. Syntynyt vuoto ei vaarantanut turvallisuutta.

Jännityskorroosiosta aiheutuvia vuotoja on haastava korjata, ja ne saattavat pysäyttää toiminnan useiksi kuukausiksi. Siksi vastaavanlainen tapahtuma kuin Oskarshamn 3 -laitoksella olisi hyvä välttää OL1- ja OL2-laitoksilla. Oskarshamn 3:n vuoto teki reaktoripaineastian hitsiyhteen

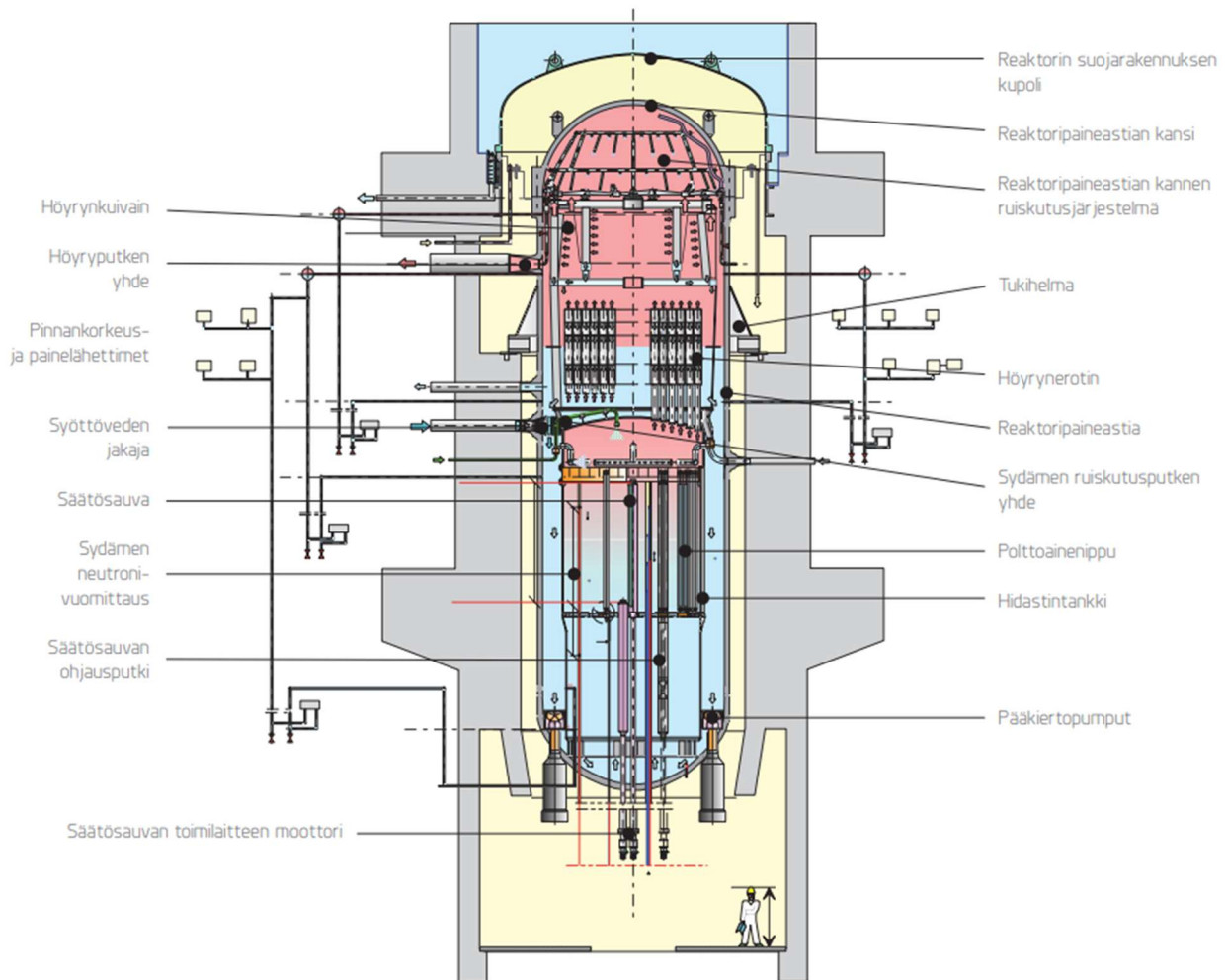
jännityskorroosiosta erittäin ajankohtaisen ja tärkeän aiheen juuri nyt, minkä takia TVO halusikin kartoittaa jännityskorroosiota ja siihen jo valmiiksi tehtyjä tutkimuksia tämän diplomityön muodossa. Jos OL1- ja OL2-laitosten käyttöikä halutaan pidentää vuoden 2048 tai jopa vuoden 2058 loppuun asti, on materiaalien täytettävä käyttökuntoisuusvaatimukset. Osana tätä on syytä harkita toimia erityisesti Inconel 182 -materiaalin jännityskorroosiosärojen osalla.

3 Reaktoripaineastia ja sen yhteet

Olkiluoto 1 ja 2 -laitokset ovat Asea Atomin BWR 75 -tyypin laitoksia, jotka on suunniteltu 1970-luvulla. Muita saman tyypin laitoksia ovat Ruotsissa sijaitsevat Oskarshamn 3 ja Forsmark 3. Laitostyyppin suunnittelun tärkeimmät lähtökohdat ovat olleet muun muassa turvallisuusvaatimusten täyttäminen, laitoksen käytettävyyttä huonontavien ominaisuuksien tunnistaminen ja poistaminen sekä työntekijöiden säteilyannoksien ja päästöjen pääsyn ympäristöön pitäminen vähäisenä. [48]

3.1 Reaktoripaineastian rakenne

Reaktoripaineastiassa (engl. *reactor pressure vessel*, RPV) sijaitsevat polttoaineputket, joissa fissioreaktio syntyy. Reaktoripaineastian toimintaympäristö on vaativa. Energiantuotantoprosessin aikana se altistuu korkeille lämpötiloille, suurille paineille ja ionisoivalle säteilylle. Paineastia tulee siis suunnitella kestäväksi niiden yhteisvaikutusta pitkäaikaisesti. Reaktoripaineastian vioittuminen voi johtaa vakaviin onnettomuuksiin ja siksi sen rakenne tulee suunnitella huomioiden materiaalien ominaisuudet ja elinikä sekä niiden kohtaama kuormituksen määrä. Reaktorin ollessa käytössä sen mahdollisia vikoja tulee seurata ja valmistautua ongelmien korjaamiseen [49]. Kiehutusvesilaitoksen reaktoripaineastian korkeus on noin 19,6 metriä, ulkohalkaisija noin 5,7 metriä ja seinämän paksuus noin 14 senttimetriä [50]. Reaktoripaineastian sisäosiin kuuluu muun muassa polttoainesauvat, säätösauvat, höyrynkuivain ja -erotin sekä pääkiertopumput. Olosuhteet vaihtelevat eri osissa reaktoripaineastiaa. Reaktorin sydämen kohdalla olevat komponentit altistuvat suurimmalle neutronivuolle. Tässä työssä käsiteltävien järjestelmien 312, 321 ja 323 reaktoripaineastian läpiviennit sijaitsevat kuitenkin etäämmällä tästä alueesta. Säteily ei siis vaikuta jännityskorroosion esiintyvyyteen niissä [51]. Kuvassa 4 näkyy reaktoripaineastian osat.



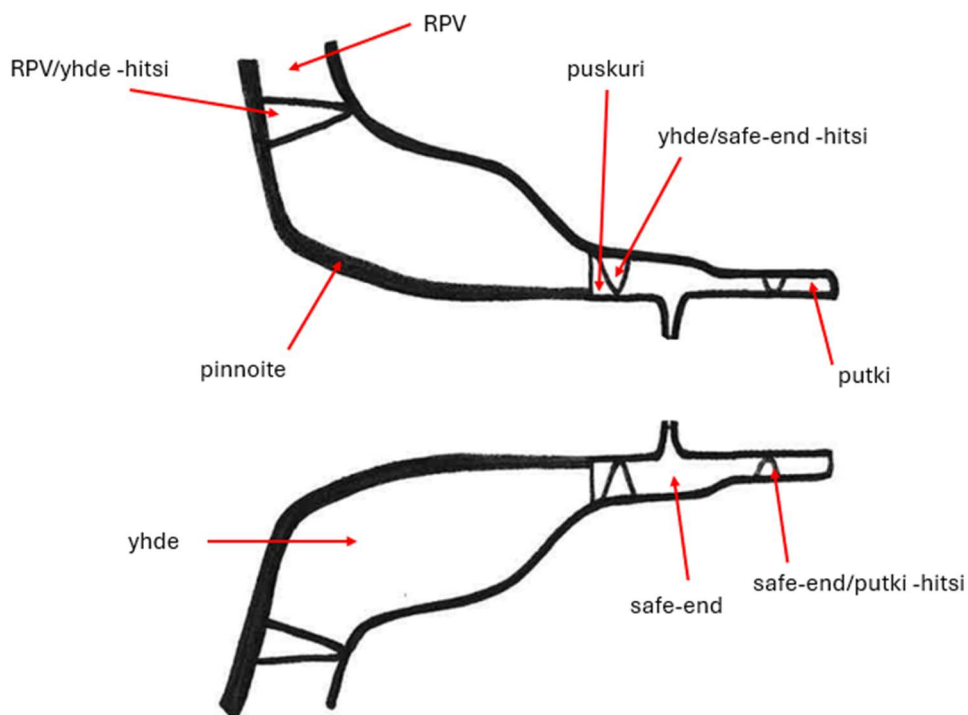
Kuva 4. Kiehuvesilaitoksen reaktoripaineastian halkileikkaus. Reaktoripaineastiassa on monia eri osia, jotka mahdollistavat sen käytön ja energiantuotannon turvallisesti. Kuva TVO: [12]

Reaktoripaineastia on suunniteltu niin, että polttoaineiden vaihto on nopeaa ja turvallista. Reaktoripaineastian kanteen ei ole liitetty ulkoisia putkiliitoksia, joten kansi saadaan irrotettua helposti ilman putkiliitosten avaamista. Kannen pultit löysätään ja kansi nostetaan hallinosturilla. Nosturilla saadaan poistettua helposti myös muut reaktorin sisäosat, koska niitä ei ole pultattu tai hitsattu kiinni. [12, 48]

Reaktoripaineastiaa ympäröi kahden metrin paksuinen betoninen biologinen suoja, joka estää reaktorin säteilyn etenemisen [12]. Reaktorin ja betonin väliin jäävä tila on ahdas ja siellä on korkeat säteilytasot, siksi työskentely siellä on haastavaa. Työskentelyyn täytyy hyödyntää siihen kehitettyjä laitteita. Reaktoripaineastian läpiviennit, joissa jännityskorroosiota esiintyy, ovat siis todella vaikeasti tavoitettavissa ja se vaikeuttaa mahdollisten vikojen havaitsemista ja korjaamista.

3.2 Reaktoripaineastian yhteen rakenne ja suunnitteluperusteet

Reaktoripaineastian yhteen rakentuvat yhdekappaleesta, safe-end-kappaleesta ja putkesta, jotka ovat kaikki eri metalleista valmistettuja. Putki liitetään reaktoripaineastiaan safe-end-liitoskappaleella, joka hitsataan hitsauslisäaineita hyödyntäen. Safe-end-liitoskappale mahdollistaa osien liittämisen toisiinsa laitoksen rakentamisaikalla ja ominaisuuksiltaan eroavien materiaalien yhdistämisen. Kuvassa 5 on piirros syöttövesijärjestelmän 312 yhteen rakenteesta. Myös puhdistus/jäähdytys- 321 ja sydämenruiskutusjärjestelmien 323 yhteen on rakennettu samalla periaatteella. Kyseistä rakennetta, jossa eri materiaaleja hitsataan yhteen, kutsutaan nimellä eripariliitoshitsi (engl. *dissimilar metal weld*, DMW) [52].



Kuva 5. Reaktoripaineastian yhteen rakenne. Yhde koostuu yhdekappaleesta ja putkesta, jotka liitetään toisiinsa safe-end-kappaleen avulla. Kuva perustuu lähteeseen [53].

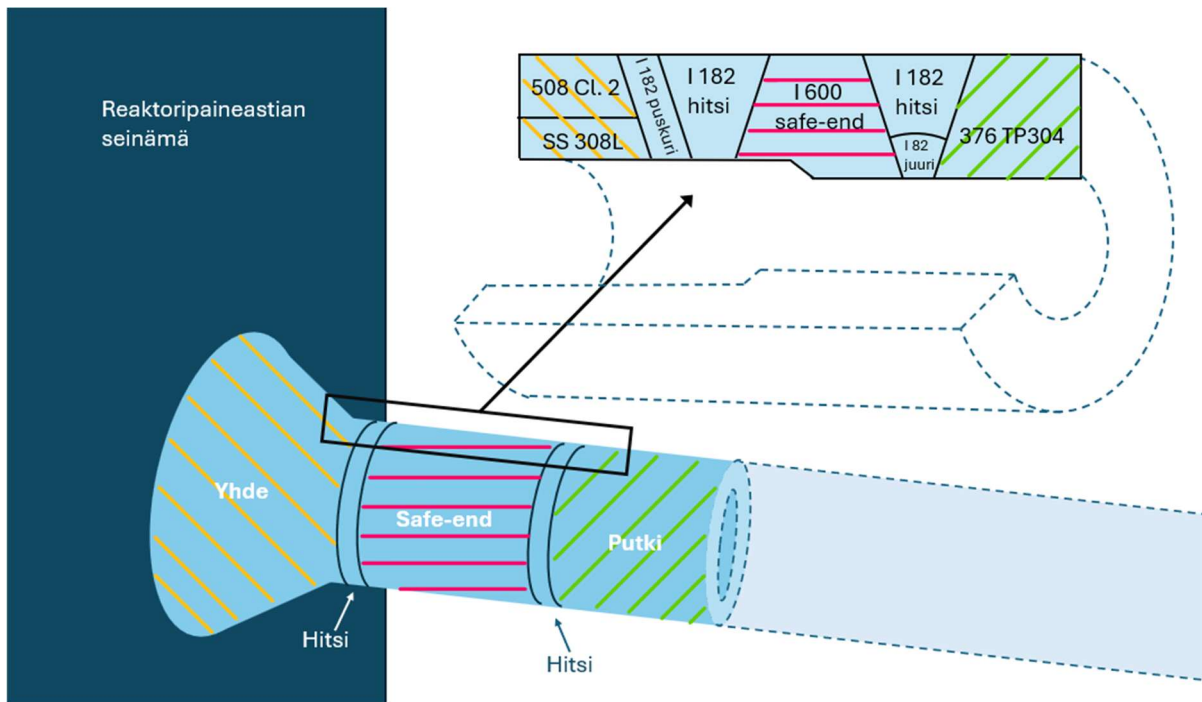
Oikeanlaiset materiaalit valitsemalla voidaan vaikuttaa merkittävästi rakenteen kestävyteen ja käyttöikään. OL1- ja OL2-laitosten reaktoripaineastian ja tärkeimpien yhdekappaleiden päämateriaalina on hyödynnetty ferriittistä niukkaseosteista terästä (engl. *low-alloy steel*, LAS) ja reaktoripaineastian sisäosissa austeniittista ruostumatonta terästä [51]. Reaktoripaineastian yhdekappaleet on valmistettu ferriittisestä SA 508 Cl. 2 teräksestä. Ferriittisillä metalleilla on hyvät mekaaniset ominaisuudet ja ne ovat edullisia [54]. Putkistoissa

vaaditaan hyvää korroosionkestävyyttä, joten safe-endiin liitetty putki on valmistettu austeniittisesta SA 376 TP304 ruostumattomasta teräksestä [54].

Nikkelipohjaisilla seoksilla on pintakeskinen kuutiollinen kiderakenne (engl. *face centered cubic lattice structure*, FCC), mikä tekee niistä sitkeitä ja muokattavia. Nikkelipohjaisia seoksia voidaan seostaa niin, että niiden ominaisuudet sopivat tiettyihin ympäristöihin. Seoksista saadaan valmistettua hyvin korroosiota kestäviä. [55] Materiaalien kromi- ja nikkelipitoisuus määrittävät pitkälti sen korroosionkestävyyden [56]. Yleisin nikkelipohjaisissa metalleissa esiintyvä vika ydinvoimalaitoksilla on jännityskorroosio [55].

Inconel-materiaalit ovat nikkelipohjaisia seoksia, jotka sisältävät yli 15 % kromia ja yli 50 % nikkeliä [56]. Inconel 182 ja 82 ovat hyvin yleisesti käytettyjä nikkelipohjaisia hitsausmateriaaleja sekä kiehutus- että painevesilaitoksilla. Näitä hitsauslisäaineita on hyödynnetty OL1- ja OL2-laitoksien reaktoripaineastian läpivientien eripariliitoshitsissä. Nikkelipohjaisten seosten käytön syynä on se, että ne ovat parempia eripariliitoshitsin hitsauslisäaineita kuin austeniittiset lisäaineet. Nikkelipohjaisilla hitseillä on paremmat mekaaniset ja metallurgiset ominaisuudet, lämpöstabiilisuus sekä lämpölaajenemiskerroin. [57]

Safe-end-liituskappaleen avulla ferriittinen ja austenittinen metalli voidaan liittää toisiinsa. Liituskappale voi olla esimerkiksi nikkelipohjaista seosta, jota hyödynnetään usein ydinvoimaloiden safe-endeissä. OL1- ja OL2-laitoksilla on hyödynnetty Inconel 600 -seosta. Inconel 600 -materiaalin lämpölaajenemiskerroin on yhdemateriaalin ja putken lämpölaajenemiskertoimien välistä, mikä pienentää lämpölaajenemiserosta johtuvia jännityksiä [58]. Kuva 6 havainnollistaa materiaalien sijainteja alkuperäisessä OL1/OL2-yhteessä. Kuva ei vastaa muodoltaan ja mittasuhteiltaan oikeaa yhdettä, vaan on yksinkertaistettu malli.



Kuva 6. Reaktoripaineastian alkuperäinen yhde ja valmistusmateriaalit OL1- ja OL2-laitoksilla.

Inconel 152/52/52M -hitsauslisäaineita on alettu 90-luvulta alkaen hyödyntää uusia laitoksia rakennettaessa ja vanhoja yhteitä korjattaessa. Ne kestävät korroosiota huomattavasti paremmin kuin Inconel 182, jossa on esiintynyt useita jännityskorroosiotapauksia [59]. Inconel 82 ei ole niin altis jännityskorroosiolle kuin Inconel 182 ja sitä on käytetty Inconel 182 -hitsien korjauksissa. Inconel 152/52/52M korroosionkestävyys selittyy korkeammalla kromipitoisuudella. Inconel 52 sisältää vähemmän niobiumia ja enemmän titaania kuin Inconel 82 ja 182. Tämän lisäksi sillä on pienempi jähmettymislämpötila-alue, kovuus ja vetolujuus [54]. Inconel 52:n hitsaaminen on kuitenkin vaikeampaa kuin metallien, joilla on alhaisempi kromipitoisuus [52]. Inconel 690 on alettu hyödyntää safe-endin materiaalina Inconel 600 sijasta, koska sen kromipitoisuus on korkeampi alentaen sen alttiutta korroosiolle [2, 58]. Taulukossa 3 on eritelty OL1- ja OL2-reaktoripaineastioiden yhteiden eri materiaalien kemialliset koostumukset.

Taulukko 3. OL1- ja OL2-laitoksilla hyödynnettyjen eripariilitoshitsirakenteiden materiaalien kemialliset koostumukset. Muokattu lähteestä [56].

| | Inconel 182 [%] | Inconel 82 [%] | Inconel 52 [%] | Inconel 152 [%] | Inconel 52M [%] | Inconel 600 [%] |
|-------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|-----------------|
| C | < 0,1 | < 0,1 | < 0,04 | < 0,05 | < 0,04 | 0,025–0,05 |
| Si | < 1 | < 0,5 | < 0,5 | < 0,75 | < 0,5 | < 0,50 |
| Mn | < 5–9,5 | < 2,5–3,5 | < 1 | < 5 | < 1 | < 1,00 |
| P | < 0,03 | < 0,03 | < 0,03 | < 0,03 | < 0,03 | 0,015 |
| S | < 0,015 | < 0,015 | < 0,015 | < 0,015 | < 0,015 | < 0,010 |
| Cr | 13–17 | 18–22 | 28–31,5 | 28–31,5 | 28–31,5 | 15,0–17,0 |
| Ni | > 59 | < 67 | Ni+Co loppuosuus | Ni+Co loppuosuus | Ni loppuosuus | > 72,0 |
| Mo | – | – | < 0,5 | < 0,5 | < 0,5 | - |
| Nb | 1–2,5 | 2–3 | Nb+Ta < 0,1 | Nb+Ta < 1,25 | 0,5–1 | - |
| Ti | < 1 | < 0,75 | < 1 | < 0,5 | < 1 | - |
| Fe | < 10 | < 3 | < 1 | < 7–12 | < 1 | 6,0–10,0 |
| Al | – | – | < 1 (Al+Ti < 1,5) | < 0,5 | < 1 (Al+Ti < 1,5) | - |
| Cu | < 0,5 | < 0,5 | < 0,3 | < 0,5 | < 0,3 | < 0,50 |
| Co | < 0,1 erikseen määritettäessä | < 0,12 erikseen määritettäessä | – | – | < 0,12 | 0,015 |
| Zr | – | – | – | – | < 0,02 | - |
| B | – | – | – | – | < 0,005 | - |
| Ta | < 0,3 erikseen määritettäessä | – | – | – | – | - |
| muut | < 0,5 | < 0,5 | < 0,5 | < 0,5 | < 0,5 | - |

Hyödynnettävien materiaalien tutkiminen laboratorio-olosuhteissa ei aina osoita materiaalin alttiutta olosuhteille. Tämä johtuu siitä, että materiaalien käyttöajat ovat pitkiä ja laboratoriokokeet huomattavasti lyhempiä [60]. Olosuhteet ja altistusaika eivät siis vastaa laboratoriossa täysin sitä, mitä materiaalit kokevat oikeissa käyttöolosuhteissa. Laboratorio-olosuhteissa kestäviksi osoittautuneet materiaalit voivat oikeissa käyttöolosuhteissa osoittautua jännityskorroosiolle alttiiksi ajan kuluessa.

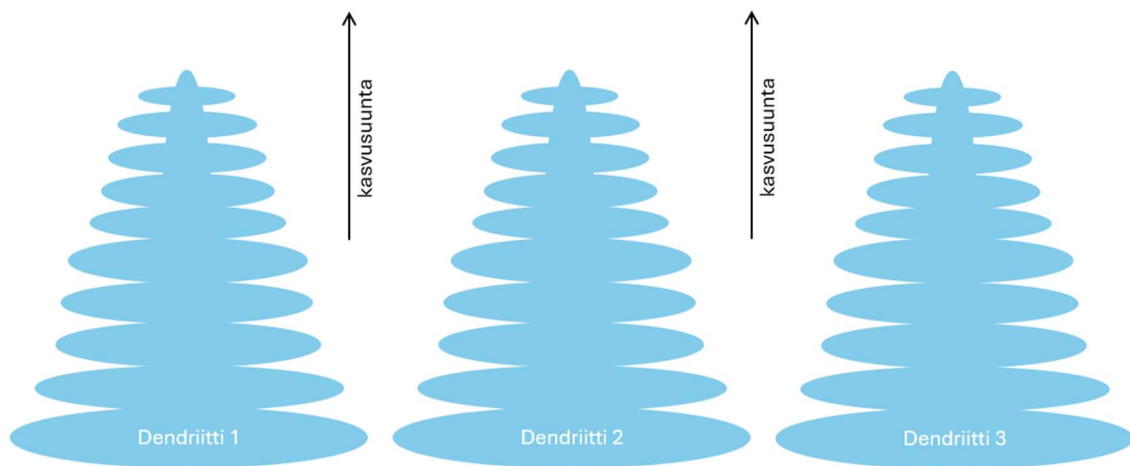
3.3 Reaktoripaineastian yhteen valmistusmenetelmä

3.3.1 Sulahitsaus

Eri hitsausmenetelmät voivat perustua sulattamiseen lämmönlähteen avulla, mekaaniseen puristukseen tai niiden yhdistelmään. Sulahitsaus ei vaadi lainkaan puristusta. Lämmönlähde sulattaa korkealla lämmöllä hitsattavien metallien vastakkaiset liitospinnat ja mahdollisen

hitsauslisäaineen, jolloin pinnalle syntyy erittäin liikkuvia atomeja. Hitsisula jähmettyy liitettävien osien väliin, atomit muodostavat sidoksen ja osat jäävät kiinni toisiinsa. [61] Alueet, jotka eivät sula, mutta niiden mikrorakenne ja mekaaniset ominaisuudet muuttuvat, ovat lämpövaikutusalueita (engl. *heat affected zone*, HAZ) [62].

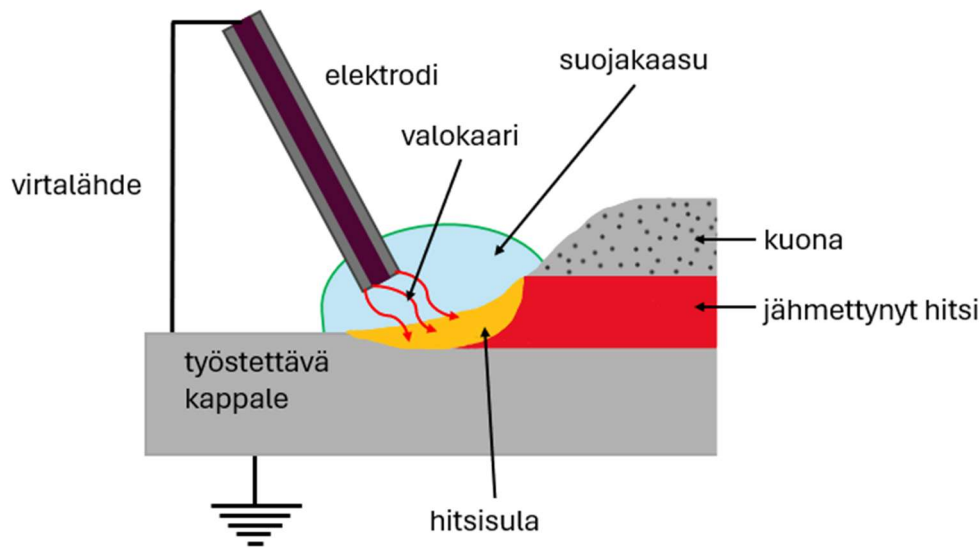
Hitsisulan jähmettyessä metallin rakenteeseen muodostuu puumaisia dendriittejä (Kuva 7). Dendriitit ovat haarautuvia ja kasvavat yleensä suotuisien kasvusuuntien mukaisesti muodostaen pylväsmäisen mikrorakenteen [63]. Dendriittien väliin jää interdendriittinen alue.



Kuva 7. Dendriittien kasvu puumaisesti hitsin jähmettyessä. Kuva perustuu lähteeseen [64].

3.3.2 Puikkohitsaus

Puikkohitsaus (engl. *shielded metal arc welding*, SMAW) on sulahitsausmenetelmä, jota käytetään hyvin yleisesti monissa sovelluskohteissa. Valokaari muodostetaan päällystetyn elektrodin eli hitsauspuikon ja työstettävän kappaleen välille. Valokaaren kuuma lämpötila sulattaa työstettävää kappaletta ja elektrodin metalliydintä eli hitsauslisäainetta. Hitsauspuikon päällyste muodostaa kaasuja, jotka syrjäyttävät ilman ja suojaavat hitsisulaa sekä valokaarta. Kun valokaari poistuu hitsattavalta alueelta, metalli jähmettyy yhtenäiseksi hitsiksi. Prosessin virtalähde kytketään sarjaan elektrodin ja työstettävän kappaleen kanssa. Elektrodilla kosketetaan aluksi työstettävää kappaletta, jonka jälkeen se otetaan pois kosketuksesta etäämmälle ja piiri pysyy avoimena. Tämän kapean raon jännitehäviö indusoi virran kulun ilman läpi synnyttäen valokaaren. [65] Prosessin toiminta on esitetty Kuvassa 8.



Kuva 8. Puikkohitsaus. Elektrodiin ja työstettävän materiaalin välille muodostetaan valokaari, jonka poistuessa hitsi jähmettyy. Elektrodiin päällyste muodostaa suojaavan kaasun. Hitsauksessa syntyy kuonaa. Kuva perustuu lähteeseen [66].

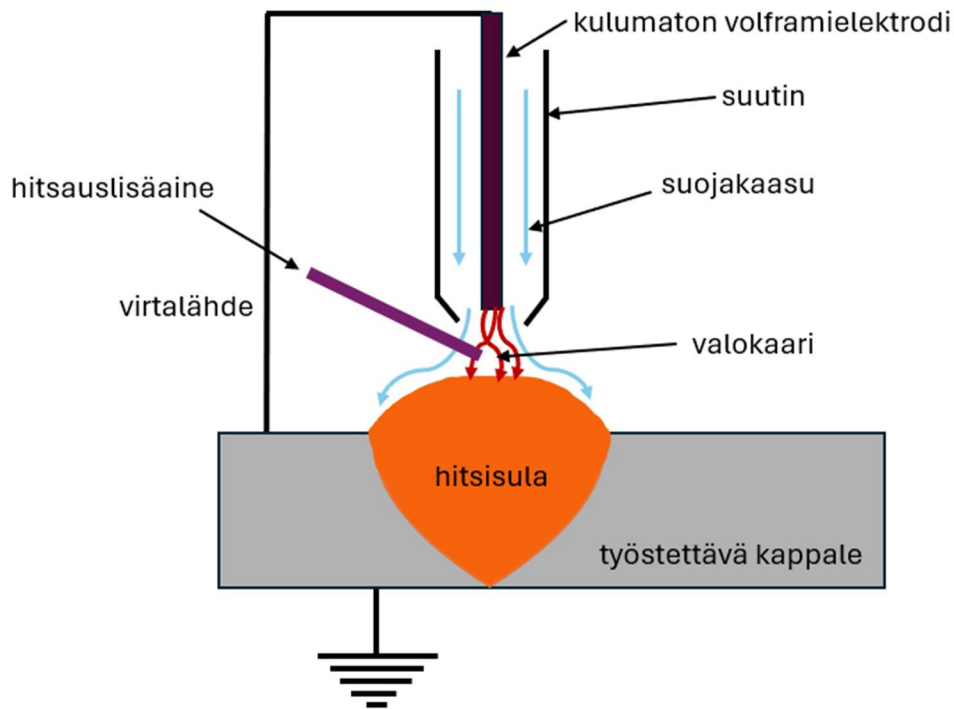
Puikkohitsauksen etuja ovat muun muassa sen yksinkertaisuus, edullisuus, joustavuus ja nopeus. Puikkohitsaukseen käytettävät välineet ovat edullisia ja yksinkertaisia käyttää verrattuna muihin tavanomaisiin hitsausmenetelmiin, kuten TIG-hitsaus. Elektrodit on helppo vaihtaa ja välineet eivät vie paljoa tilaa, joten hitsaus onnistuu ahtaammissakin paikoissa. Prosessissa ei tarvita erillistä suojaakaasua, koska hitsauspuikon päällyste muodostaa suojaavia kaasuja. [67]

Puikkohitsauksen heikkouksia voivat olla riittämätön sulaminen ja kuonan kertyminen. Jos elektrodi on huonossa asennossa, materiaali ei pääse sulamaan kunnolla. Manuaalisesti hitsatessa riski sille on suuri. Hitsatessa materiaalin päälle kertyy kuonaa, joka pitää puhdistaa, jottei se aiheuta hitsiin vikoja. [67] Viat hitsissä voi toimia jännityskorroosion syntymiskohtina.

3.3.3 TIG-hitsaus

TIG-hitsaus (engl. *gas tungsten arc welding*, GTAW) on sulahitsausmenetelmä, jota voidaan käyttää lähes kaikkien metallien hitsaamiseen. Siinä voidaan tarvittaessa hyödyntää hitsauslisäaineita. TIG-hitsaus on haastavampi ja hitaampi hitsausmenetelmä kuin puikkohitsaus ja vaatii hitsaajalta enemmän taitoa. Valokaari muodostetaan kulumattoman volframielektrodiin ja työstettävän kappaleen välille, kun virta kulkee johtavan ionisoidun suojaakaasun läpi. Volframielektrodi on kiinni polttimessa. Suojaakaasu syötetään polttimen kautta ja syntynyt inertti kaasu suojaa elektrodia ja hitsisulaa. Valokaari sulattaa työstettävää

materiaalia ja syntyy hitsisula. Mahdollinen hitsauslisäaine syötetään nauhana hitsisulaan. [68]
 Prosessin toiminta on esitetty Kuvassa 9.



Kuva 9. TIG-hitsaus. Kulumattoman volfrاميةlektrodin ja työstettävän kappaleen välille muodostetaan valokaari, kun virta kulkee johtavan ionisoidun suojakaasun läpi. Valokaari sulattaa työstettävää materiaalia. Kuva perustuu lähteeseen [69].

TIG-hitsauksen etuja ovat muun muassa hitsausasentojen monipuolisuus, laadukas työn tulos ja lukuiset eri materiaalivaihtoehdot. Hitsausprosessi voidaan automatisoida ja ohjelmoida niin, että se onnistuu etäohjauksella. TIG-hitsaus voidaan suorittaa missä vain asennossa, ja se sopii monien eri kappaleiden hitsaamiseen laadukkaalla hitsaustuloksella. Koska hitsausprosessissa voidaan hyödyntää lähes kaikkia metalleja, se on hyvä menetelmä eripariliitoshitsien valmistuksessa ja korjauksessa. TIG-hitsauksen heikkouksia ovat hitsausprosessiin vaadittu näppäryys ja koordinaatio hitsaajalta, kalliimpi hinta verrattuna esimerkiksi puikkohitsaukseen sekä magneettikentän ja ilmavirtojen mahdollinen negatiivinen vaikutus hitsausprosessin hallintaan ja laatuun. [68]

3.3.4 Eripariliitoshitsien hitsaaminen

Eripariliitoshitsien osat muodostuvat eri metalliseoksista, joilla on eri fyysiset ja mekaaniset ominaisuudet sekä lämpöominaisuudet. Niukkaseosteisten terästen, ruostumattomien terästen ja nikkelpohjaisten seosten eriparihitsit ovat yleisiä ydinvoimalaitoksella esiintyviä hitsejä. Eri

metalleja yhdistelemällä voidaan säästää materiaalikustannuksissa ja saavuttaa parempi suorituskyky korkeissa lämpötiloissa. [52]

Eripariliitoshitsien materiaaleja valitessa tulee huomioida [65]:

- hitsattavuus
- mahdollisuus intermetallisten yhdisteiden muodostumiselle
- korroosioalttius
- käyttöolosuhteet

Jotta eri materiaalit saadaan yhdistettyä toisiinsa sulahitsauksella, niiden täytyy voida sulaa nesteeksi [65]. Suuret erot materiaalien sulamispisteissä tekee hitsaamisesta vaikeampaa [67]. Lisähaasteita aiheuttaa hitsattavien materiaalien lämpölaajenemiskertoimien, lämmönjohtavuuksien tai ominaislämpökapasiteettien väliset erot [67]. Kahden metallin siirtymäalueelle voi syntyä hitsauksen takia intermetallisia yhdisteitä [65, 67]. Intermetallinen alue saattaa olla hyvin altis säröjen muodostumiselle ulkoisen jännityksen vaikuttaessa [45]. Sähkökemiallisesti toisistaan eroavat materiaalit altistavat rakenteen korroosiolle ja jännityskorroosiolle. Ympäröivät olosuhteet, kuten lämpötila ja kuormitus, vaikuttavat myös alttiuteen [65].

OL1- ja OL2-laitoksilla Inconel 182 -materiaalia on hitsattu puikkohitsauksella, kun taas reaktoripaineastian läpivientien juurihitseissä sekä yhteiden korjauksissa käytettyä Inconel 82 -materiaalia on hitsattu TIG-hitsauksella.

Hitsit ovat alttiita erilaisille hitsausvirheille, joten vikoja, voi syntyä jo valmistusvaiheessa, ennen kuin hitsattu kappale on otettu käyttöön. Myös materiaalin koneistus saattaa aiheuttaa vikoja sen rakenteeseen. Jos materiaalissa on valmiiksi murtumia, tietynlaisissa ympäristön olosuhteissa jännityskorroosio voi mahdollisesti käynnistyä näistä valmistuksen aikaisista vioista. [55] Metallien eroavaisuudet mekaanisilta ja metallurgisilta ominaisuuksiltaan, jäännösjännitykset ja lämpöjännitykset tekevät kestävien eripariliitoshitsien valmistamisesta haastavaa [57]. Vaikka nikkelpohjaisten seosten on aikanaan todettu olevan sopivia eripariliitoshitsien hitsauslisäaineita ydinvoimalaitoksella, muun muassa niiden korroosionkestävyyden takia, niiden käytössä on esiintynyt ongelmia [57].

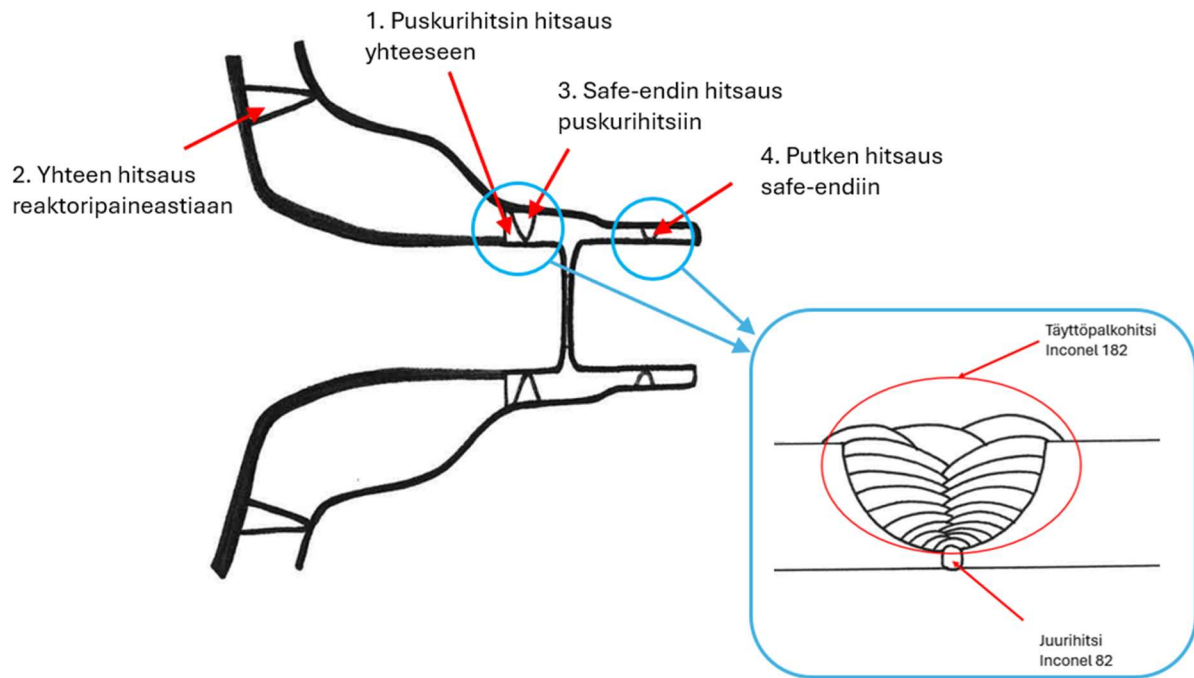
3.3.5 Lämpökäsittely

Lämpökäsittelyllä voidaan vaikuttaa metallin ominaisuuksiin kuten sitkeyteen, raekokoon ja vetolujuuteen, jotta se sopii mahdollisimman hyvin käyttötarkoitukseensa. Hitsauksen aiheuttamia jäännösjännityksiä pienennetään lämpökäsittelemällä niitä [50]. Eri metalliseokset voivat kuitenkin reagoida eri tavalla lämpökäsittelyyn, mikä tekee eripariliitoshitsien lämpökäsittelystä haastavaa [52]. Hitsauksen jälkeinen lämpökäsittely (engl. *post-weld heat treatment*, PWHT) on usein käytetty hitsien käsittelytapa ydinvoimaloissa. Mitä korkeampi lämpökäsittelyn lämpötila on, sitä vakaampi mikrorakenne voidaan saavuttaa käsittelyn tuloksena [70]. Joissain tapauksissa lämpökäsittelyn on kuitenkin havaittu aiheuttaneen materiaalin herkistymisen [50].

Olkiluoto 1 ja 2 -laitosten yhteiden Inconel 182 -puskurihitsit on lämpökäsitelty reaktoripaineastian ja yhdekappaleen kanssa yli 600 celsiusasteessa ja muut hitsiliitoksen osat on lisätty lämpökäsittelyn jälkeen [70]. Niitä ei ole siis lämpökäsitelty hitsauksen jälkeen.

3.3.6 Valmistuksen kulku

Reaktoripaineastian yhteiden valmistus tapahtuu sekä paikan päällä laitoksella että tehtaalla. Reaktoripaineastiaan lisätään osia valmistuspajalla ennen kuin reaktoripaineastia viedään laitoksen rakennuspaikalle. Näin varmistetaan, että hitsit on valmistettu mahdollisimman laadukkaasti parhaissa mahdollisissa olosuhteissa. [71] Yhteiden valmistus alkaa puskurihitsien hitsaamisella yhdekappaleeseen ja sen jälkeen niitä lämpökäsitetään jännitysten vähentämiseksi. Lämpökäsitellyt yhdekappaleet hitsataan kiinni reaktoripaineastiaan ja ne lämpökäsitetään vielä viimeisen kerran. Safe-end-kappale hitsataan kiinni puskurihitsiin TIG- ja puikkohitsausmenetelmiä hyödyntäen, ensin hitsin juuri TIG-menetelmällä ja loput hitsistä puikkohitsausmenetelmällä. Hitsauksen jälkeen hitsi ja safe-end-kappale koneistetaan. Juurihitsiä ei jää jäljelle koneistuksen jälkeen. Yhteet valmistetaan loppuun laitoksen rakennuspaikalla. Koneistettuun safe-end kappaleeseen hitsataan kiinni putki hyödyntäen taas hitsin juureen TIG-menetelmää ja loppuhitsiin puikkohitsausmenetelmää. Lopuksi hitsi vielä koneistetaan sen siistimiseksi, mutta ulompaa juurihitsiä ei koneisteta pois. [53] Kuvassa 10 on esitetty yhteen osien hitsausjärjestys sekä hitsin rakenne.



Kuva 10. Reaktoripaineastian yhteen osien hitsausjärjestys ja hitsin rakenne. Ensimmäisenä yhteeseen hitsataan puskurihitti, tämän jälkeen yhde hitsataan reaktoripaineastiaan, safe-end puskurihittiin ja putki safe-endiin. Hitsin juuri on valmistettu Inconel 82 -materiaalista ja täyttöpalko Inconel 182 -materiaalista. Kuva perustuu lähteeseen [53].

3.4 Rikkomaton aineenkoetus

Jännityskorroosion esiintyminen komponenteissa vaatii niiden jatkuvaa tutkimista ja tarkastelua. Näin vaurioiden kokoa, laatua ja kasvunopeutta voidaan seurata, jolloin ne voidaan korjata ennen kuin särö ehtii aiheuttaa vuodon. Materiaaleja tutkitaan valmistuksen ja käytön aikana määräaikaistarkastuksilla. Reaktoripaineastian läpivientien eripariliitoshitsit vaativat tiheennettyjä tarkastuksia niiden jännityskorroosioalttiuden takia. Tarkastusten avulla voidaan selvittää ja löytää materiaalissa olevia vikoja ja niiden kokoa. Määräaikaistarkastusten avulla varmistetaan laitoksen turvallinen käyttö ja käyttöiän optimoiminen [72]. TVO noudattaa ASME:n asettamia vaatimuksia sen tarkastuksissa. ASME Section XI, Division 1 asettaa vaatimukset kevytvesijäähdytteisten ydinvoimalaitosten käytönajan tarkastuksille [73].

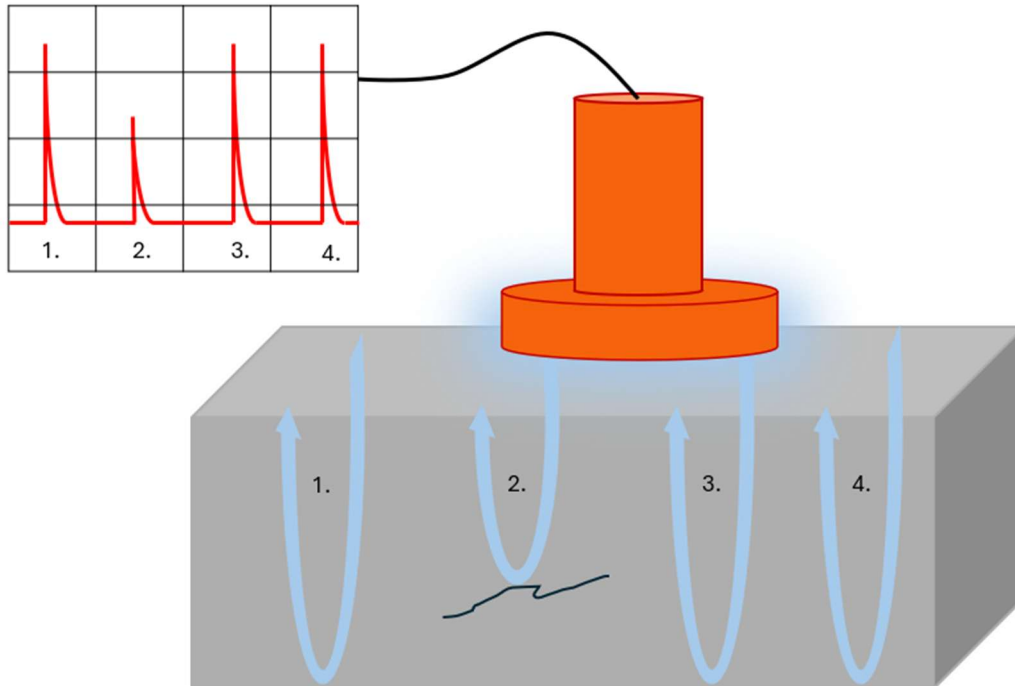
Määräaikaistarkastuksissa hyödynnetään rikkomatonta aineenkoetusta eli NDT-tarkastuksia (engl. *non-destructive testing*, NDT). Siinä tutkittavana oleva komponentti ei hajoa testauksessa tai muuten vahingoita sitä, vaan se säilyy ehjänä [74]. Itse yhdehistsistä otetut näytteet tuottaisivat luotettavinta tietoa. Näytekappaleiden ottaminen yhteistä ei kuitenkaan ole mahdollista, koska se vaikuttaisi niiden käytettävyyteen. Rikkomatonta aineenkoetusta käytetään jännityskorroosion tutkimiseen ydinvoimalaitoksilla, koska se mahdollistaa käytössä

olevien komponenttien tutkimisen ja mahdollisten syntyvien vaurioiden havaitsemisen, ennen kuin ne ehtivät edetä liian pitkälle.

Rikkomattoman aineenkoetuksen tuloksena saadaan indikaatioita, jotka voivat mahdollisesti olla epäjatkuvuuksia ja vikoja materiaalissa. Kaikki indikaatiot eivät kuitenkaan ole relevantteja, ja saatu indikaatio voi erota materiaalissa sijaitsevasta virheestä huomattavasti. TVO:lla on käytössä yhdehitsien tarkastuksiin kaksi rikkomattoman aineenkoetuksen menetelmää, ultraäänitarkastus ja pyörrevirtatarkastus.

3.4.1 Ultraäänitarkastus

Ultraäänitarkastuksissa (engl. *ultrasonic testing*, UT) korkeataajuisia ääniaaltoja lähetetään tutkittavaan materiaaliin ja ääniaallon takaisinheijastumisaika mitataan. Ääniaalto heijastuu takaisin, jos tutkittavassa materiaalissa on katkos. Tämä epäjatkuvuus voi olla virhe materiaalissa, kuten särö, tai se voi olla ääniaalto, joka on kulkenut virheettömän materiaalin läpi ja heijastuu takaisin sen seinämästä. Takaisin heijastunut ääniaalto muokataan sähköiseksi signaaliksi, jolloin nähdään signaalin voimakkuus suhteessa aikaan. Signaalien avulla määritetään epäjatkuvuuden tyyppi ja sijainti materiaalissa. [75] Ultraäänitarkastus vaatii kytkentäaineen (engl. *couplant*), joka johtaa hyvin ääniaaltoja ja auttaa niiden siirtymistä testattavaan kappaleeseen, joten se ei sovellu särön kasvunseurantaan [76]. Ultraäänitarkastuksen toimintaperiaate on esitetty Kuvassa 11.

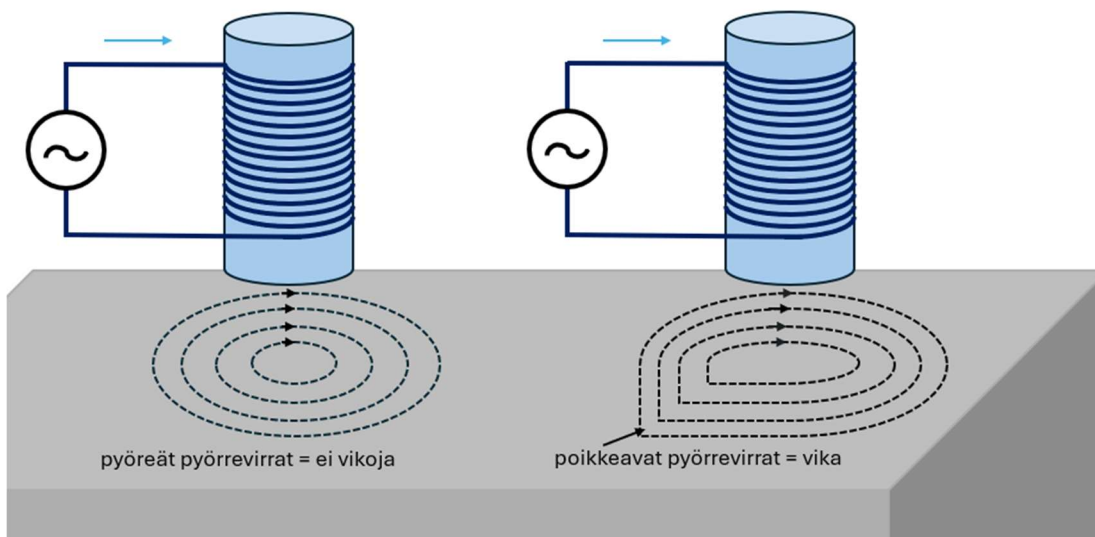


Kuva 11. Ultraäänitarkastuksen periaate. Takaisin heijastuneet ääniaallot muokataan sähköiseksi signaaliksi. Epäjatkuneeseen materiaaliin törmännyt aalto heijastuu aiemmin kuin aallot, jotka heijastuvat takaisin vasta, kun ne ovat kulkeneet koko materiaalin läpi. Kuva perustuu lähteeseen [77].

Vaiheistetussa ultraäänitarkastuksessa (engl. *phased array ultrasonic testing*, PAUT) yhdellä luotaimella voidaan suorittaa samat tarkastelut kuin monella luotaimella perinteisellä ultraäänimenetelmällä. Luotain koostuu useista elementeistä, jotka vaiheistetaan toimimaan eri aikaviiveillä, jolloin ultraäänit voidaan esimerkiksi ohjata eri kulmiin ja tarkentaa eri syvyyksiin. Menetelmän avulla suuriakin alueita saadaan tarkastettua nopeasti ja se sopii monien eri muotoisten kappaleiden tutkimiseen. [78]

3.4.2 Pyörrevirtatarkastus

Pyörrevirtatarkastus (engl. *eddy current testing*, ET) hyödyntää magneettikenttää säröjen havaitsemiseksi. Menetelmä ei vaadi kytkentäainetta, ja tutkimus voidaan suorittaa ilman luotaimen ja testikappaleen fyysistä kontaktia [76]. Menetelmä usein myös havaitsee pienet viat herkemmin kuin ultraäänitarkastus [58]. Kun tutkittava kappale on luotaimen synnyttämässä magneettikentässä, muuttuva magneettivuo indusoi materiaaliin pyörrevirtoja. Jos materiaalissa on vika, kuten särö, pyörrevirtojen eteneminen materiaalissa on poikkeavaa verrattuna ehjään materiaaliin [76, 79]. Materiaalin tarkastus pyörrevirtojen avulla on esitetty Kuvassa 12.



Kuva 12. Pyörrevirtatarkastus. Pyöreät pyörrevirrat syntyvät, kun materiaalissa ei ole vikoja. Kun pyörrevirta ei ole pyöreä ja poikkeaa radaltaan, materiaalissa on vika. Kuva perustuu lähteeseen [80].

3.4.3 Tarkastusten luotettavuus

Rikkomattoman aineenkoetuksen menetelmillä kaikkia vikoja ei aina havaita tai niiden oikea koko on todellisuudessa suurempi kuin tarkastusmenetelmät antavat ymmärtää. Tällöin vika havaitaan vasta vuodon esiintyessä. Jännityskorroosiosäröjen alkaminen saattaa olla todella hidasta, kun taas niiden eteneminen voi olla huomattavasti nopeampaa. Määräaikaistarkastusten havaitsemistarkkuuden epävarmuus aiheuttaa sen, että jännityskorroosiosärö saattaa päästä kasvamaan koko materiaalin läpi aiheuttaen vuodon.

Ultraäänitarkastusten luotettavuuteen vaikuttaa muun muassa särön koko, muoto ja sijainti, tutkittavan kappaleen pinta ja kaarevuus, materiaalin raerakenne, hitsin rakenne, ääniaaltojen taajuus ja kulma, ääniaaltojen interferenssi, kytkentäaine sekä inhimilliset tekijät [81]. Vaiheistettu ultraäänitarkastus on huomattavasti luotettavampi keino kuin perinteinen ultraäänitarkastus yksinään, koska se mahdollistaa useammat tarkastuskulmat [82]. Parhaat mittaustarkkuudet saavutetaan kuitenkin hyödyntämällä sekä perinteistä että vaiheistettua ultraäänitarkastusta [83].

Pyörrevirtatarkastusten on havaittu olevan luotettavin rikkomaton aineenkoetusmenetelmä säröjen pituuksien arvioimisessa. [82, 83] Menetelmä ei kuitenkaan sovi särön syvyyden tarkkaan arvioimiseen [82]. Pyörrevirtatarkastusten luotettavuuteen vaikuttavat muun muassa materiaalin sähkönjohtavuus ja magneettinen permeabiliteetti, tutkittavan kappaleen paksuus, pinta ja kaarevuus sekä testausanturin taajuus ja etäisyys tutkittavasta kappaleesta. [83]

Eripariliitoshitsien määräaikaistarkastuksien on havaittu tuottavan luotettavampia tuloksia ja nostavan havaintotodennäköisyyttä, kun testit tehdään yhteen sisäpuolelta verrattuna ulkopuolelta tehtyihin testauksiin. Kehämäisten säröjen havaitsemisen on havaittu olevan helpompaa kuin aksiaalisten vikojen. [82] Useampien eri tarkastusmenetelmien hyödyntäminen helpottaa vikojen havaitsemista ja saatujen indikaatioiden todenmukaisuutta.

NDT-tarkastusten luotettavuuden osoittamiseksi ne arvioidaan systemaattisesti ja riippumattomasti, jotta voidaan osoittaa tarkastusten tehokkuus ja toistettavuus. Tarkastelussa arvioidaan käytettävä laitteisto, tarkastukset suorittava henkilöstö ja tarkastuksessa noudatettavat menettelytavat. NDT-tarkastuksen kvalifioimiseksi noudatetaan siihen annettuja sääntöjä, joita ASME XI -standardi säätelee. [82] Tarkastusten kvalifioimiseksi käytetään testikappaletta, johon on keinotekoisesti valmistettu vikoja. Havaittuja indikaatioita verrataan testikappaleen todellisiin vikoihin. Kvalifiointi on kuitenkin haastavaa, koska testikappaleiden keinotekoisesti valmistetut viat eivät vastaa kenttäolosuhteissa syntyneitä jännityskorroosiosäröjä. [84] Tämä voi johtaa vikojen kokojen aliarvioimiseen ja odottamattomien vuotojen syntyyn.

Sama indikaatio oli havaittu vuosina 2003–2010 Olkiluodon laitoksen reaktoripaineastian läpiviennin eripariliitoshitsissä pyörrevirtatarkastuksissa. Vuonna 2011 otettiin käyttöön vaiheistettu ultraäänitarkastus. Menetelmä kvalifioitiin ennen vuoden 2012 vuosihuoltoa. Taulukon 4 indikaation tarkastustuloksissa havaitaan suurempaa vaihtelua, kun uusi tarkastusmenetelmä otettiin käyttöön. Kaikki pyörrevirtamenetelmällä tehdyt tarkastukset ovat antaneet lähes samoja arvoja, mutta ultraäänitarkastuksen antamat arvot poikkeavat niistä. Särön tarkastelua varten kehitettiin särökoolle optimoitu tarkastus, jolloin särön syvyydelle saatiin aikaisemmista tarkastuksista poikkeava suurempi särösyvyys. [85] Eri menetelmät saattavat siis antaa toisistaan suuresti poikkeavia tuloksia. Vuoden 2017 korjauksessa kyseisen indikaation syvyyden havaittiin olevan yli 30 mm, joka on merkittävästi suurempi kuin Taulukon 4 indikaatiot [86]. Todennäköisesti hitsauksen lämmöntuonti vaikutti särön avautumiseen [86].

Taulukko 4. Indikaation tarkastustulokset vuodesta 2003 vuoteen 2014. Muokattu lähteestä [85] Teknologian tutkimuskeskuksen VTT Oy ja Teollisuuden Voima Oyj luvalla.

| tarkastusajankohta | pituus [mm] | syvyys [mm] | sijainti hitsissä [°] | poikkeama hitsin keskiviivasta [mm] | tarkastusmenetelmä | mittaus sisä-/ulkopuolelta |
|--------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------------------------------|--------------------|----------------------------|
| R203, vuosi 2003 | 12 | 9,0 | 94 | -10...+2 | ET | sisä |
| R204, vuosi 2004 | 12 | 9,8 | 94 | -10...+2 | ET | sisä |
| R205, vuosi 2005 | 14 | 10,1 | 92,4 | -12...+2 | ET | sisä |
| R206, vuosi 2006 | 14 | 9,7 | 92,4 | -13...+1 | ET | sisä |
| R207, vuosi 2007 | 14 | 9,7 | 91,5 | -13...+1 | ET | sisä |
| R209, vuosi 2009 | 14 | 9,7 | 91,0 | -13...+1 | ET | sisä |
| R211, vuosi 2011 | 13 | 9,8 | 91,0 | -12...+1 | ET | sisä |
| R211, vuosi 2011 | 13 | 15,3 | 91,5 | -12...+1 | PAUT | sisä |
| R212, vuosi 2011 | 14 | 9,7 | 93,2 | -13...+1 | ET | sisä |
| R212, vuosi 2012 | 14 | 15,3 | 93,2 | -13...+1 | PAUT | sisä |
| R213, vuosi 2013 | 14 | 9,7 | 92,5 | -13...+1 | ET | sisä |
| R213, vuosi 2013 | 14 | 15,3 | 92,5 | -13...+1 | PAUT | sisä |
| R213, vuosi 2013 | 14 | 23,1 | 94,4 | | optimoitu PAUT | ulko |
| R214, vuosi 2014 | 14 | 15,3 | 92,5 | -13...+1 | PAUT | sisä |
| R214, vuosi 2014 | 14 | 22,8 | 93,4 | | optimoitu PAUT | ulko |

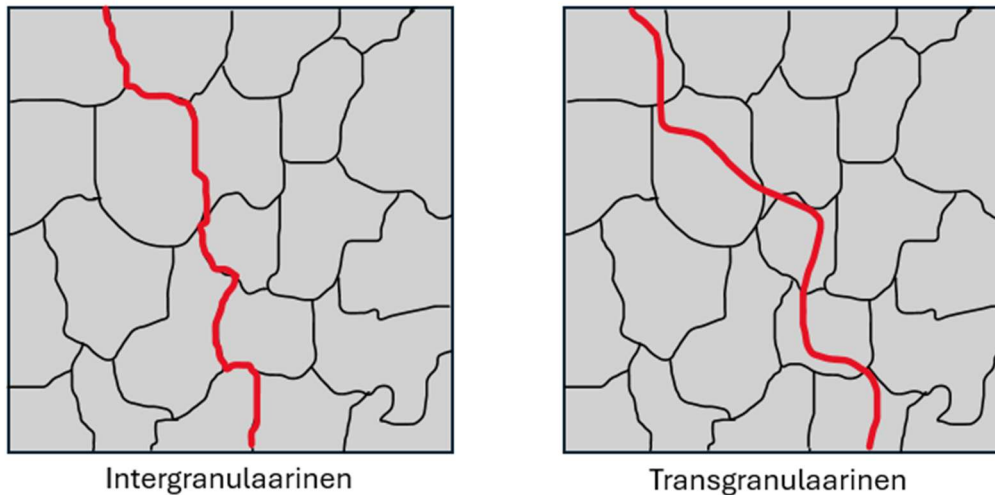
4 Reaktoripaineastian yhteen säröily kiehutusvesilaitoksella

4.1 Jännityskorroosio

Jännityskorroosion aiheuttama säröily on ympäristöavusteista murtumista, joka syntyy vetojännityksen ja korroosion yhteisvaikutuksesta. Jännityskorroosiosäröjen on havaittu etenevän pääasiassa eripariliitoshitsien Inconel 182 -materiaalissa ja korkeahiilisten ruostumattomien terästen HAZ-alueella. Jännityskorroosiota esiintyy eri muodoissa, joita ovat [4]:

- raerajajännityskorroosio (engl. *intergranular stress corrosion cracking*, IGSCC)
- rakeen läpi etenevä jännityskorroosio (engl. *transgranular stress corrosion cracking*, TGSCC)
- dendriittivälien jännityskorroosio (engl. *interdendritic stress corrosion cracking*, IDSCC)
- säteilyavusteinen jännityskorroosio (engl. *irradiation-assisted stress corrosion cracking*, IASCC)
- primääriveden jännityskorroosio (engl. *primary water stress corrosion cracking*, PWSCC).

Jännityskorroosiosäröt muistuttavat haurasta murtumaa, koska ne etenevät ilman tai lähes ilman plastista muodonmuutosta [3]. Raerajajännityskorroosio etenee materiaalin raerajoja pitkin ja rakeen läpi etenevä jännityskorroosio materiaalin raerajojen läpi (Kuva 13). Materiaalissa voi esiintyä samaan aikaan näitä molempia muotoja ja yksittäinen särö saattaa kulkea sekä raerajoja pitkin että niiden läpi. [3, 50] Dendriittivälien jännityskorroosio esiintyy hitsin metallurgisessa rakenteessa ja kulkee hitsin dendriittirajoja pitkin [4]. Jännityskorroosio nikkelpohjaisissa hitseissä on dendriittiväleissä esiintyvää jännityskorroosiota [54].



Kuva 13. Jännityskorroosiosärön eteneminen materiaalin raerakenteessa raerajoja pitkin (intergranulaarinen) ja rakeiden läpi (transgranulaarinen).

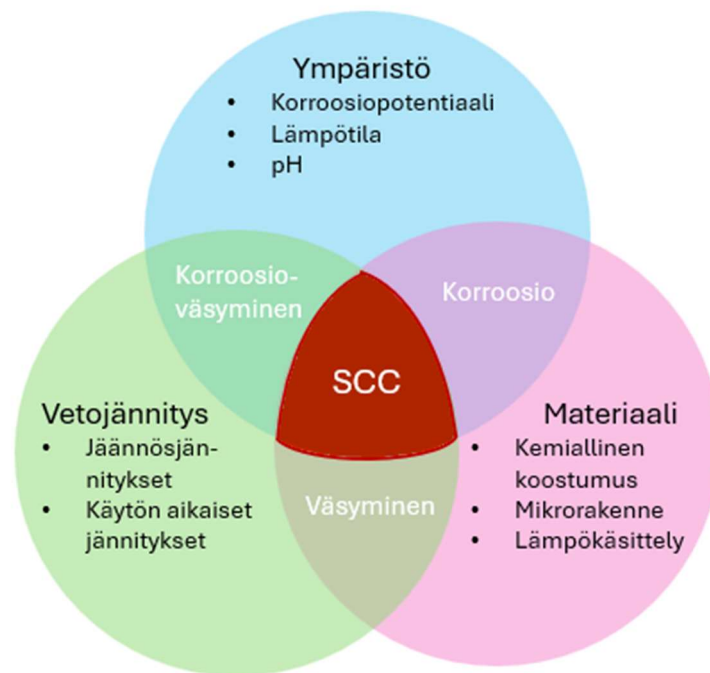
Säteilyavusteinen jännityskorroosio voi esiintyä materiaaleissa, jotka altistuvat suurelle määrälle neutronisäteilyä [50]. Neutronisäteily saa atomeja irtoamaan paikaltaan uusille paikoille muodostaen kiderakenteeseen aukkoja eli vakansseja. Irtoavat atomit voivat ahtautua kiderakenteen pienille tyhjille alueille, joissa ei ole normaalisti atomia. Näitä muiden atomien sekaan ahtautuneita atomeja kutsutaan välisija-atomeiksi. Vakanssit ja välisija-atomit ovat kidevirheitä ja ne voivat aiheuttaa merkittäviä muutoksia materiaalin mikrorakenteeseen. [52] Säteilyn vaikutusta ei huomioida tässä työssä, koska kuten aikaisemmin mainittiin, käsiteltävät reaktoripaineastian yhteydet eivät altistu suurelle säteilymäärälle ja niissä ei siksi esiinny säteilyavusteista jännityskorroosiota. Primääriveden jännityskorroosio esiintyy painevesilaitoksen primääripiirin ruostumattomasta teräksestä valmistetuissa rakenteissa. Muita jännityskorroosion muotoja on kaikkia esiintynyt kiehutusvesilaitoksella korkean hiilipitoisuuden teräksissä ja Inconel 182 -materiaalissa.

Tässä työssä käsitellään Inconel 182 -seoksen jännityskorroosiota, mutta myös ruostumattomat teräkset ovat jännityskorroosiolle alttiita kiehutusvesilaitoksen olosuhteissa. Lämpöherkistyminen johtuen kromikarbiden muodostumisesta raerajoille on pääasiassa ruostumattoman teräksen jännityskorroosiolle altistavia tekijä. Herkistymisessä raerajoille muodostuu kromikarbideja, kun kromi reagoi hiilen kanssa. Rajoja ympäröivä alue köyhtyy kromista. Kromin köyhtyminen altistaa raerajat IGSCC:lle ja särön kasvun nopeutumiseksi, koska köyhtyneille alueille ei muodostu passiivista kerrosta. Inconel 182/600 -seoksiin on lisätty niobiumia lämpöherkistymisen estämiseksi. Toinen monesti jännityskorroosiolle altistava tekijä on kylmämuokkauksesta syntyvät suuret jäännösjännitykset. [3]

Kylmämuokatuilla materiaaleilla on korkeampi myötölujuus mutta pienempi murtovenymä, mikä tekee niistä alttiimman jännityskorroosiolle [55].

4.2 Jännityskorroosiolle altistavat tekijät

Jännityskorroosion syntymiseen vaaditaan kolme eri tekijää, jotka ovat altis materiaali, altistava ympäristö sekä jännitys. Nämä tekijät on esitetty Kuvassa 14. Alttiin materiaalin herkistyminen korroosiolle altistavalle ympäristölle ja vetojännitykselle riittävän ajan kuluessa johtaa säröjen syntymiseen. Kun jokin jännityskorroosion syntymiseen vaadittavista tekijöistä poistetaan tai heikennetään, jännityskorroosiota ei esiinny [3]. Kaikki tekijät vaikuttavat samaan aikaan ja rajakynnys jännityskorroosion aiheuttamien säröjen syntyyn riippuu kaikkien tekijöiden yhteisvaikutuksesta. Särön synnyn ja kasvun ennustaminen sekä juurisyyn selvittäminen on siis vaikeaa.



Kuva 14. Jännityskorroosiolle altistavat tekijät: ympäristö, materiaali ja vetojännitys. Jännityskorroosiota esiintyy, kun kaikki tekijät vaikuttavat samaan aikaan (punainen alue). Kuva perustuu lähteeseen [87].

Jännityskorroosion syntymiselle on yritetty määrittää mekanismeita. Eri mekanismeista on kuitenkin erimielisyyksiä, koska jännityskorroosioilmiötä ei täysin ymmärretä vielä. Jännityskorroosiota synnyttävä mekanismi riippuu vaikuttavasta ympäristöstä ja ympäristölle altistuvasta materiaalista. [88]

4.2.1 Materiaali

OL1- ja OL2-laitosten reaktoripaineastian yhteen eripariliitoshitsin rakenteesta ja siihen valituista materiaaleista on kerrottu kappaleessa 3.2. Valitut materiaalit ja niiden käsittely vaikuttavat olennaisesti yhteen vaurioitumisherkkyyteen. Eripariliitoshitsin materiaalit muodostavat rakenteeseen alueita, joilla on erilaiset mekaaniset ja metallurgiset ominaisuudet.

Metallin alttiuteen jännityskorroosiolle vaikuttaa sen ominaisuudet, joita ovat: kemiallinen koostumus, rakeiden suuntaus ja koko, dislokaatiot, erkaumat ja faasimuutokset. Metallien seostuksella voidaan vaikuttaa sen passiivisuuteen reaktorivedessä tai muussa korroosiolle alttiissa ympäristössä ja näin tehdä siitä korroosionkestävämpää. Lämpökäsittelyllä muokataan materiaalin mikrorakennetta, jotta rakenteesta saadaan vakaampi. Pienemmät raekoot eivät yleensä ole yhtä alttiita jännityskorroosiolle. Materiaalin käsittely voi myös johtaa rakenteen heikkenemiseen. Lujuudella on suuri merkitys materiaalin vaurioitumisalttiuteen. [88]

Inconel 182 sijasta Inconel 690/152/52/52M -materiaaleja on alettu hyödyntää laitoksilla niiden paremman korroosionkestävyyden vuoksi. Ne ovat uudemman sukupolven laitoksissa, kuten Olkiluoto 3 -laitoksessa, käytettyjä materiaaleja [52]. Nikkelipohjaisten metallien jännityskorroosioalttiutta voidaan merkittävästi pienentää, kun seos sisältää noin 30 painoprosenttia kromia, kuten Inconel 690/152/52/52M [56]. Inconel 600/182/82 taas sisältävät yleensä alle 20 painoprosenttia kromia (Taulukko 3).

Hitsatessa materiaalit sulavat ja eri materiaalien välille syntyy sekoittumisvyöhyke (engl. *fusion zone*, FZ). Sekoittumisvyöhykkeellä on monimutkainen mikrorakenne, jossa on vaihteluita kemiallisessa koostumuksessa ja hitsauksesta aiheutuneita mikrotason jäännösjännityksiä. Tämä tekee sen alttiimmaksi vaurioille. Hitsin sulaminen ja jähmettyminen vaikuttavat merkittävästi sen mikrorakenteen muodostumiseen, eikä valitun hitsausmateriaalin rakenne vastaa siis valmiin hitsin rakennetta. Suuremmilla jäähtymisnopeuksilla solumaiset dendriitit alkavat muuttua pylväsmäisiksi dendriiteiksi ja ne muodostuvat tiheämmin vakauttaen rakennetta ja parantaen mekaanisia ominaisuuksia. Kun rakenteen pääjännitys on samansuuntainen dendriittien jähmettymissuunnan kanssa, alttius jännityskorroosiolle pienenee. [56]

Seosaineet kuten fosfori (P), rikki (S) ja pii (Si) voivat kiihdyttää särön kasvua. Fosfori ja rikki rikastuvat dendriittirajoille kiihdyttäen särön kasvua. Pii altistaa materiaalin kuumahalkeilulle hitsauksen yhteydessä, jolloin rakenteeseen syntyy vikoja jo valmistuksen aikana hitsin

jähmettyessä. Vanhojen säröjen yhdistyminen uusiin jännityskorroosion synnyttämiin säröihin kiihdyttää jännityskorroosion etenemistä. [89] Kuumahalkeamat voivat olla vaikeaa erottaa dendriittivälien jännityskorroosiosta, koska kummatkin etenevät dendriittirajaa pitkin [54]. Kuumahalkeamat eivät etene käytön aikana, mutta jännityskorroosion aiheuttamat säröt etenevät [4].

4.2.2 Jännitys

Reaktoripaineastian yhteisiin vaikuttavat omasta painosta, sisäisestä paineesta, lämpölaajenemisesta ja virtauksesta aiheutuvat jännitykset sekä valmistuksesta ja korjauksista aiheutuvat jännitykset. Jännityskorroosiota aiheuttavat vetosuuntaiset jäännösjännitykset, jotka ovat yleensä materiaalin myötörajan suuruisia [90]. Ulkoiset kuormitukset ovat mekaanisia kuormia ja lämpökuormia, joita syntyy reaktorin ollessa käytössä sekä reaktorin ylös- ja alasajoissa. Reaktori ei ole koko ajan käytössä, vaan se pysäytetään esimerkiksi huoltojen yhteydessä tai poikkeavissa ajotilanteissa. Alasajojen yhteydessä lämpötila laskee ja se nousee taas reaktorin ylösajossa. Lämpötilojen muutokset vaikuttavat rakenteisiin vaikuttavien jännitysten suuruuksiin. Erot materiaalien lämpölaajenemiskertoimissa on huomioitu laitosten rakenteissa, joten vaikka lämpötilan vaihtelut aiheuttavat jännityksiä, ne eivät kasva liian suuriksi. [50]

Laitoksen rakenteet altistuvat erilämpöisille virtauksille, mikä aiheuttaa nopeita lämpötilan muutoksia. Ne saattavat altistaa materiaalin vaihteleville jännitysten suuruuksille. Kylmän ja kuuman veden sekoittuminen voi aiheuttaa putkeen termisiä säröjä toistuvan lämpötilavaihtelun takia. Laitoksen käytössä myös paineen ja virtausnopeuksien muutokset vaikuttavat jännitysten suuruuksiin. Veden tasaisesta virtauksesta aiheutuu reaktiovoimia. Epätasaisuudet veden virtauksessa saavat rakenteet värähtelemään aiheuttaen niihin väsyttäviä jännityksiä. Myös rakenteiden oma massa aiheuttaa rakenteeseen jännityksiä. [50]

Seismistä toimintaa ei alun perin otettu huomioon OL1- ja OL2-laitoksia rakentaessa, vaan se huomioitiin vasta Fukushima onnettomuuden jälkeen. Onnettomuuden jälkeen laitoksilla toteutettiin turvallisuusparannuksia [91]. Suomessa seisminen toiminta on kuitenkin vähäistä ja pientä, joten se ei aiheuta merkittäviä jännityksiä. Kaikki värähtelyn aiheuttamat jännitykset ovat merkityksettömiä tämän työn tarkastelun osalta.

Monissa tapauksissa jännityskorroosion esiintyessä materiaaliin ei ole kohdistunut ulkoisten kuormien aiheuttamia jännityksiä ja jännityskorroosio on silti päässyt etenemään [90]. Tällöin

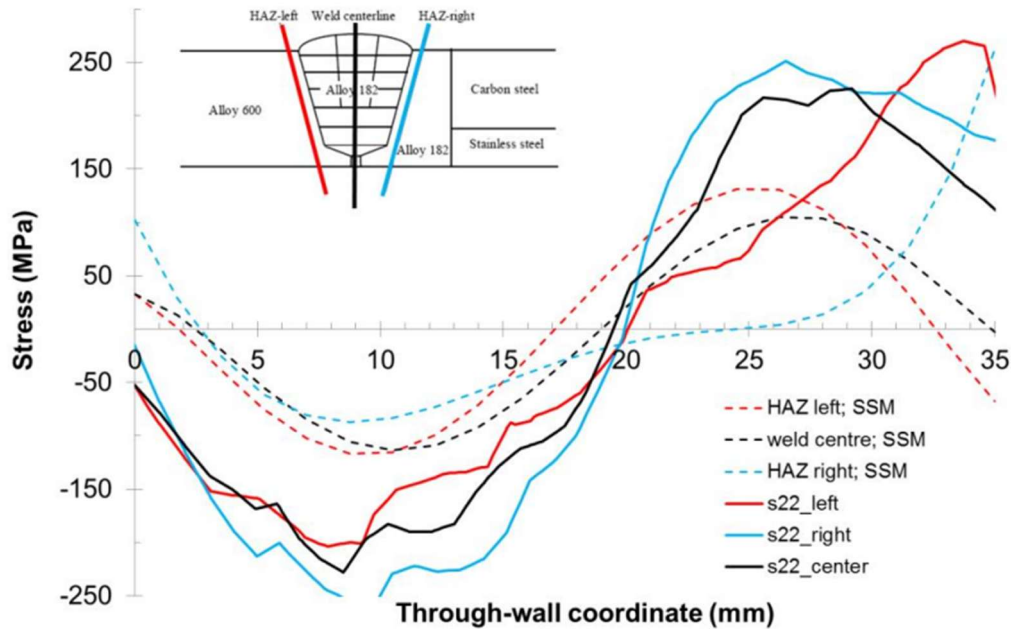
vaikuttavat jännitykset ovat jäännösjännityksiä eli materiaalin sisäisiä jännityksiä. Hitsaus, kylmämuokkaus ja lämpökäsittely ovat valmistusmenetelmiä, joista voi jäädä jäännösjännityksiä valmistettuihin rakenteisiin. Valmistusmenetelmien aiheuttamien jäännösjännitysten lisäksi rakenteessa vaikuttavat rakenteen materiaalien eroavaisuuksista ja epäyhteensopivuudesta johtuvat jännitykset. Myös mahdollinen mekaaninen kuormitus käytön aikana, joka johtaa materiaalin plastiseen muodonmuutokseen, aiheuttaa rakenteeseen jäännösjännityksiä. [56]

Jännitykset voivat altistaa materiaalin jännityskorroosiolle, koska putken sisäpuolella on sekä vetojännityksiä että korroosiolle altistava ympäristö. Vetojännitykset syntyvät, kun hitsauksesta syntyneiden metallien lämpötilaerot ja metallien myötörajojen erot tekevät rakenteen tilavuuden muutoksista epätasaisia [56]. Hitsausjäännösjännitykset (engl. *welding residual stress*, WRS) ovat putken sisäpinnalla yleensä aksiaalisessa suunnassa vetäviä materiaalin myötörajan suuruisia jännityksiä. Jännitykset yleensä pienenevät putken ulkopinnalla ja muuttuvat puristaviksi. [50] Eriparihitsiliitosten hitsaaminen muodostaa jäännösjännityksiä rakenteeseen. Nikkeliseos jähmettyy korkeassa lämpötilassa, mistä seuraa isommat jäännösjännitykset. Rakenteeseen syntyy sekä veto- että puristusjäännityksiä [92]. Vetojännitykset edistävät jännityskorroosion etenemistä, kun taas puristusjäännitykset voivat hidastaa tai pysäyttää jännityskorroosion. Hitsauksesta aiheutuneiden jännitysten muodostumiseen vaikuttavat muun muassa lämmönsyöttö, hitsausjärjestys ja ympäröivä geometria [57].

Sulahitsauksessa hitsattavan materiaalin lämpötila nostetaan korkeaksi, jotta se sulaa ja samalla se lämpölaajenee eli sen tilavuus kasvaa. Jäähdyessään metalli jähmettyy uudelleen ja se kutistuu eli sen tilavuus pienenee. Hitsauksesta aiheutuvat jäännösjännitykset syntyvät hitsirakenteen kutistumisesta. Materiaalien kutistuminen ja sen epätasaisuus aiheuttavat erot lämpötiloissa rakenteen eri alueilla [92]. Hitsin juuri hitsataan ensimmäisenä, jolloin sen ympärille kehittyy puristusjäännityksiä. Kun seuraava hitsi hitsataan juuren päälle, juuri rajoittaa uuden hitsin kutistumista ja uusi kutistuva hitsi vetää ympäröiviä seinämiä. Tämä johtaa jäännösjännityskenttään, jossa sisäpinnassa on puristusjäännityksiä ja ulompana vetojännityksiä.

Kuvassa 15 on esitetty reaktoripaineastian eripariliitoshitsin laskelmoidut aksiaaliset jäännösjännitykset hitsin keskellä ja sen molemmipuolisilla lämpövaikutusalueilla. Kuvasta nähdään, että putken sisäosassa on puristavia jännityksiä (negatiivisia), jotka muuttuvat vetäviksi (positiivisiksi) edetessä putken ulkopinnalle. Koska jännityskorroosion syntymiseen

vaaditaan vetojännitys, särö ei voisi päästä kuvan perusteella etenemään koko hitsin seinämän läpi. Käytännössä valmistuksen aikaiset korjaukset aiheuttavat muita jännitystiloja.



Kuva 15. Hitsiliitoksen aksiaalinen jäännösjännitys seinämän läpi edetessä. Jäännösjännitys on arvoltaan negatiivinen putken sisäosassa, jolloin jännitys on puristusjännitystä ja positiivinen putken ulkoseinämässä, jolloin jännitys on vetojännitystä. Lainattu lähteestä [93] Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy ja Teollisuuden Voima Oyj luvalla.

Hitsiliitoksen jännitysten mittaaminen on haastavaa, koska siihen vaikuttavat sekä ulkoiset kuormitukset että jäännösjännitykset. Hitsiliitoksen vaurioalttiuden tutkimiseksi tulee jokaisen eri materiaalialueen lujuus- ja sitkeysominaisuuksien vaikutukset rakenteeseen selvittää perinpohjaisesti. [59]

Jotta voidaan todistaa jäännösjännitysten olevan merkittävämpiä kuin muut jännitykset, lasketaan muista tekijöistä johtuvien jännitysten suuruudet yhteessä sisemmän hitsin kohdalla. Laskujen kaavat on saatu lähteestä [94]. Pienin sallittu putken seinämän paksuus e suoralle putkelle sisäisen paineen alaisena lasketaan Kaavalla 1, kun $D_o/D_i \leq 1,7$ [94]

$$e = \frac{p_c D_o}{2fz + p_c}, \quad (1)$$

jossa p_c on suunnittelupaine, D_o on putken ulkokehän halkaisija, f on kehäjännitys ja z on liitoksen lujuuskerroin. Ratkaistaan kaavasta kehäjännitys hitsiyhteen sisemmän hitsin kohdalla.

$$D_o = 360 \text{ mm [95]}, D_i = 280 \text{ mm [95]}, p_c = 7 \text{ MPa}, z = 1$$

Käyttäen lähteen [95] arvoja ja yllä esitettyä kaavaa hitsiyhteen sisemmän hitsin kohdalla kehäjännitykseksi saadaan

$$f = \frac{p_c D_o - e p_c}{2 e z}$$

$$f = \frac{p_c D_o - e p_c}{2 e z} = \frac{7 \text{ MPa} \cdot 360 \text{ mm} - 40 \text{ mm} \cdot 7 \text{ MPa}}{2 \cdot 40 \text{ mm} \cdot 1} = 28 \text{ MPa}$$

Saatu kehäjännityksen arvo 28 MPa on siis pieni eikä vastaa jäännösjännitysten suuruuksia (Kuva 15). Jäännösjännityksen suuruudet voivat olla jopa 250 MPa, jolloin kehäjännityksen arvo 28 MPa on jäännösjännityksiin verrattuna pientä. Lasketaan seuraavaksi aksiaalisten jännitysten σ_4 suuruus yhteessä Kaavalla 2.

$$\sigma_4 = \frac{p_c d_o}{4e} + \frac{0,75i M_A}{Z} + \frac{i M_C}{Z}, \quad (2)$$

jossa p_c on suunnittelupaine, d_o on ulkokehän halkaisija, e on seinämän paksuus, i jännitysintensiiteettikerroin, joka lasketaan kaavalla 3, jossa $0,75i \geq 1$ ja $i \geq 1$. M_A on jatkuvista mekaanisista kuormista (putkiston oma paino, nesteen paino, paineen aiheuttamat voimat) aiheutuva momentti, M_C on lämpölaajenemisesta ja vaihtokuormituksesta aiheutuva momentti ja Z on putken taivutusvastus, joka lasketaan Kaavalla 4. Komponenttimomentit kunkin koordinaattiakselin läpi on saatu TVO:n omista laskelmista (Kaavat 5 ja 6). Kaavan 3 kohdalla on tehty yksinkertaistus jättämällä epäkeskisyyssitermi pois. Sen vaikutus tuloksiin ja sitä kautta päätelmiin on vähäinen.

$$i = 1,3 + 0,0036 \frac{d_o}{e_n} \quad (3)$$

$$Z = \frac{\pi}{32} \frac{d_o^4 - d_i^4}{d_o} \quad (4)$$

$$Z = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(360 \text{ mm})^4 - (280 \text{ mm})^4}{360 \text{ mm}} = 2904228 \text{ mm}^3$$

$$M_A = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} \quad (5)$$

$$M_A = \sqrt{((-19400000 \text{ Nmm})^2 + (-23600000 \text{ Nmm})^2 + (385254 \text{ Nmm})^2} = 30552715 \text{ Nmm}$$

$$M_C = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} \quad (6)$$

$$M_C = \sqrt{((-21300000 \text{ Nmm})^2 + (-35400000 \text{ Nmm})^2 + (-4544846 \text{ Nmm})^2} = 41563273 \text{ Nmm}$$

Ratkaistaan Kaavasta 2 hitsiyhteen aksiaaliset jännitykset

$$\sigma_4 = \frac{7 \text{ Mpa} \cdot 360 \text{ mm}}{4 \cdot 40 \text{ mm}} + \frac{1 \cdot 30552715 \text{ Nmm}}{2904228 \text{ mm}^3} + \frac{\left(1,3 + 0,0036 \frac{360 \text{ mm}}{40 \text{ mm}}\right) \cdot 41563273 \text{ Nmm}}{2904228 \text{ mm}^3} = 45,3 \text{ MPa}$$

Jännityksen arvo 45,3 MPa on laskettu laitoksen täyden tehon tilanteessa eikä aksiaalisten jännitysten arvot kasva siis yhtä suuriksi kuin jäännösjännitykset. Tehtyjen laskelmien perusteella voidaan päätellä, että hitsauksen aiheuttamat jäännösjännitykset (Kuva 15) ovat suurempia kuin muut yhteeseen vaikuttavat jännitykset. Säröilyn syntymisessä vetävät jäännösjännitykset ovat ajava voima.

4.2.3 Ympäristö

Vettä käytetään reaktorissa jäähdytteenä ja hidastimena. Jatkuva jäähdytys on ensisijaisen tärkeää, koska fissioreaktio tuottaa suuren määrän energiaa ja lämmöntuotanto jatkuu pitkään. Reaktoripaineastian osat siis altistuvat kuumalle vedelle, joka altistaa ne jännityskorroosiolle. Kaikki materiaalit eivät altistu jännityskorroosiolle samassa ympäristössä, vaan erilaiset ympäristöt voivat altistaa ne niiden ominaisuuksien mukaan [3]. BWR-laitoksen vesi on erittäin puhdasta, jotta sen ominaisuuksia, kuten koostumusta, pystytään hallitsemaan. Ominaisuuksien hallintaa kutsutaan vesikemiaksi ja se on oleellista korroosioalttiuden pienentämiseksi [96].

Veden eri parametrejä hallinnoidaan suositeltujen kemian arvojen saavuttamiseksi ja ylläpitämiseksi. OL1- ja OL2-laitoksilla noudatetaan EPRI:n ohjeistuksia vesikemian arvoista [50]. Jännityskorroosioalttiuteen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi epäpuhtaudet vedessä, sähkökemiallinen potentiaali ja lämpötila. Veden sähkönjohtavuus kertoo siihen liuenneiden ionisten yhdisteiden määrään, koska ne johtavat sähköä. Sähkönjohtavuuden arvo ei saa nousta liian korkeaksi. Koska reaktorissa käytetty vesi on niin puhdasta, sähkönjohtavuuden avulla voidaan arvioida myös muita kemiallisia parametrejä. [97] Sähkökemiallinen potentiaali kertoo materiaalin herkkyuden korroosiolle tietyissä olosuhteissa ja vaikuttaa särön kasvun nopeuteen [55]. Sähkökemiallisen potentiaalin arvo nousee reaktoriveteen liuenneen hapen (O₂) ja vetyperoksidin (H₂O₂) takia. Veden happipitoisuus on 200 ppb (*parts per billion*, tilavuuden miljardisosa) BWR-laitoksen normaalissa vesikemiassa. [97] Korkea happipitoisuus nostaa

veden hapettavuutta, jolloin myös siinä olevien materiaalien sähkökemiallinen potentiaali on korkealla [54]. Jännityskorroosiota voi kuitenkin esiintyä millä tahansa sähkökemiallisen potentiaalilla, mutta yleensä paikalliskorroosiota esiintyy hapettavissa olosuhteissa [55].

Sulfaattit kiihdyttävät särön kasvunopeutta, kun ne rikastuvat särön kärkeen suurina pitoisuuksina normaalissa vesikemiassa. Särön kasvun nopeutumiselle altistavien sulfaattien määrä riippuu virtausolosuhteista ja epäpuhtaus transienttien eli epäpuhtauksien tilapäisen esiintymisen kestosta. Liuenneiden sulfaattien korkea pitoisuus voi muuttaa veden pH:n neutraalista happamaksi, jolloin säröjen kasvu on nopeampaa. Särön kasvunopeus voi jatkua kiihtyneenä jopa 100 tuntia sulfaattien rikastumisen jälkeen, vaikka vesi olisi nimellisesti puhdasta huomattavasti aikaisemmin. Särön kasvun huomattava kiihtyminen on havaittu noin 1 ppm (*parts per million*, tilavuuden miljoonasosa) pitoisuuksilla. [56] Myös kloridit altistavat jännityskorroosiolle [3]. Olkiluodon 1 ja 2 laitoksilla on esiintynyt merivesivuotoja. Etenkin alkuperäinen messinkilauhduutin sai merivesivuotoja.

Lämpötila vaikuttaa merkittävästi korroosion esiintyvyyteen nikkelioksidoissa [98]. Koska energiantuotanto tapahtuu vettä kiehattamalla, lämpötilat reaktorissa nousevat korkeiksi. Kiehausvesilaitoksen käyttölämpötila on noin 286°C [15]. Kiehausvesireaktorin käyttölämpötila on noin 50 celsiusastetta alhaisempi kuin painevesilaitoksella, joten lämpötilaltaan olosuhteet eivät ole niin alttiit jännityskorroosion etenemiselle. Särön etenemisnopeus saattaa olla jopa kymmenkertainen painevesilaitoksella lämpötilaeron takia [56]. Korkea lämpötila lisää myös oksidien liukoisuutta [89]. Joidenkin materiaalien on havaittu olevan jännityskorroosiolle alttiita myös alhaisemmissa lämpötiloissa (engl. *low temperature crack propagation*, LTCP) noin 50–150 celsiusasteessa. LTCP-ilmiossa vety tekee särön etenemismekanismista hauraamman. Nikkelipohjaiset Inconel-seokset ovat osoittaneet alttiutta jännityskorroosiolle myös näissä olosuhteissa. [99]

Ympäristön aiheuttaman jännityskorroosioalttiuden minimointia vesikemian arvoja optimoimalla, hyödyntäen vedyn reagoimista hapettavien aineiden kanssa, käsitellään kappaleessa 5.1.

4.2.4 Jännityskorroosiota selittävät mekanismit

Jännityskorroosiolle on ehdotettu useita syntymekanismia, jotka eroavat toisistaan enemmän tai vähemmän. Yksimielisyyteen näistä mekanismeista ei ole päästy. Vetyhaurastuminen on yksi mekanismeista, joilla jännityskorroosiota usein selitetään. Se on särön kärkialueen

mekanismi. Ilmiössä korkean vetytitoisuuden vuoksi vety jää metallin kiderakenteeseen raerajoille ja näillä alueilla on usein suuria vetojännityksiä. Vety altistaa materiaalin säröilylle tehden materiaalista hauraamman. Metallin mikrorakenne vaikuttaa merkittävästi siihen, kuinka helposti vety pääsee tunkeutumaan rakenteeseen. [2] Lämpökäsittely voi altistaa materiaalin vetyhauraudelle. Vetyhaurauden on katsottu myös olevan täysin erillinen mekanismi jännityskorroosiosta. Tätä perustellaan sillä, että vety tunkeutuu metallin rakenteeseen, eikä sovi siksi perinteisen korroosion määritelmään. Vetyä kuitenkin syntyy katodisten reaktioiden tuotteena, joten vetyhaurauden katsotaan usein olevan mahdollinen jännityskorroosiomekanismi [88].

Toinen yleinen jännityskorroosiota selittävä särön kärkialueen mekanismi on liukenemisesta/hapettumisesta (*slip-oxidation mechanism*) johtuva jännityskorroosio. Se on yleisimmin käytetty mekanismi selittämään jännityskorroosiota kiehutusvesilaitoksilla. Siinä särön kärjen paikallinen venymä rikkoo pintaa suojaavan passiivisen oksidikalvon. [4] Kalvon rikkoutumisen nopeuteen vaikuttavat jännitykset ja metallin mikrorakenne [100]. Oksidikalvon alta paljastuneesta metallista muodostuu anodinen alue ja lopusta metallipinnasta katodinen alue [88]. Anodinen särön kärki alkaa liueta ja särön kärjen ja suuaukon välille syntyy sähkökemiallinen potentiaaliero. Metallia liukenee, kunnes pintaan on muodostunut uusi oksidikalvo [4]. Kalvon uudelleen muodostumisen nopeuteen vaikuttavat esimerkiksi ympäristön lämpötila ja pH-arvo sekä metallin kemiallinen koostumus [100]. Särö pääsee etenemään, kun passiivinen kalvo hajoaa ja passivoituu yhä uudelleen ja uudelleen. [4]

4.3 Särön kasvu

Jännityskorroosion käynnistyminen alkaa usein materiaalissa olleesta paikalliskorroosiosta [55]. Jännityskorroosiosärö etenee useimmiten kohtisuorassa päävetojännitykseen nähden ja se syntyy ilman tai lähes ilman plastista muodonmuutosta. Siksi materiaalissa ei näy selkeää muutosta särön syntymisen jäljiltä. [3] Särön muodon muodostumiseen vaikuttavat ympäristö, materiaalin mikrorakenne sekä materiaaliin vaikuttavan jännityksen tyyppi ja suunta [90]. Koska jännityskorroosio vaatii korroosiolle altistavan ympäristön, jännityskorroosiosäröt ulottuvat putken sisäpintaan, joka on kosketuksissa veden kanssa [4].

Jännityskorroosiosärön kasvu alkaa, kun materiaali on tarpeeksi suuren jännityksen alaisena tietynlaisessa ympäristössä. Jännityksen arvon ei tarvitse yltää materiaalin myötörajaan asti särön kasvun alkamiseksi, jos materiaalin ja ympäristön yhdistelmä saa säröilyn alkamaan ennen tätä. Särön kasvun alkamisvaiheen kesto vaihtelee ja voi kestää pisimmillään jopa

vuosikymmeniä [3]. Säröilyn käynnistävän jännityksen suuruuden arviointi on haasteellista ja aikaa vievää, koska säröilyn alkamiseen voi mennä hyvin pitkiä aikoja [44]. Säröilyn käynnistymisvaihe määrittää pääasiassa säröilevän materiaalin käyttöiän, eikä säröilyn etenemisvaihe ole yhtä merkittävä sen kannalta [100]. Säröilyn alkamisvaiheen jälkeen alkaa etenemisvaihe ja lopulta syvyyssuunnassa jäännösjännitykset laskevat merkittävästi, mikä hidastaa tai jopa keskeyttää särön etenemisen. Säröily voi käynnistyä uudelleen vanhan särön kärjestä yhä korroosiolle altistavan ympäristön ja särön kärkeen keskittyvien jännitysten vaikutuksesta [88].

Koska särö etenee useimmiten kohtisuoraan suurinta vetojännitystä vastaan, aksiaalinen vetojännitys edistää särön etenemistä putken kehän suuntaisesti, kun taas kehäsuuntainen vetojännitys edistää särön etenemistä aksiaalisessa suunnassa. Kuvassa 15 on esitetty aksiaaliset jäännösjännitykset yhdehissä, jotka ovat putken sisäosassa on puristavia jännityksiä ja muuttuvat vetäviksi edetessä ulkopinnalle. Säröt voivat olla haarauneita ja kaareutuvia [56]. Kehäsuuntaiset säröt ovat vaarallisempia, koska ne voivat edetä koko hitsin läpi. Silloin särö pääsisi kiertämään koko putken kehän. Inconel 182 -hitsille on ominaista, että aksiaalinen särö katkaisee hitsin poikkisuorasti eikä lähde etenemään hitsiä pitkin.

Inconel 82 -materiaalissa havaitut säröilytapaukset ovat hyvin harvinaisia kiehutusvesilaitoksilla. Ruotsissa on havaittu tapaus, jossa säröily alkaa hitsissä, jonka juurihitsi on valmistettu Inconel 82 -materiaalista. Inconel 82 pitäisi siis suojata Inconel 182 -hitsiä, jotta jännityskorroosiota ei voi esiintyä. Säröilyn kuitenkin selittää Inconel 82 ja 182 sekoittuminen hitsatessa, jolloin lopullinen materiaali on ollut näiden seos, joka on jännityskorroosiolle alttiimpi kuin Inconel 82. [4] Jännityskorroosiolle altis materiaali pääsee sekoittumisen myötä kontaktiin veden kanssa. Myös Inconel 82 -juuren hitsauksen viat voivat mahdollisesti saada aikaan jännityskorroosion esiintymisen.

Särön kasvua ja laatua tarkkaillaan kappaleessa 3.4 esiteltyillä tarkastusmenetelmillä. Särön etenemistä yritetään ennakoida analyysien avulla, jotta tiedetään, pysyykö särö sallituissa mitoissa vai pitääkö säröilevä kohta korjata. ASME määrittelee sallittavat laskennalliset särökoot yhteessä. Sallittu särökoko riippuu muun muassa materiaalista, särön sijainnista ja suunnasta sekä putken seinämän paksuudesta [73].

4.4 Säröilyyn johtavat tekijät

Jännityskorroosion aiheuttama säröily johtuu monen tekijän yhteisvaikutuksesta, eikä yksittäisestä tekijästä. Kuten aiemmin mainittiin, materiaali, ympäristö ja jännitykset johtavat ilmiön syntymiseen. Inconel 182 -materiaali ei ole käyttövarma kiehutusvesilaitoksen olosuhteissa ja siksi jännityskorroosion aiheuttamia vikoja on esiintynyt paljon vanhemman sukupolven ydinvoimalaitoksilla. Eri tekijöiden merkityksen suuruutta säröilyn syntymiseen punnitaan tässä kappaleessa.

Reaktoripaineastian yhteeseen vaikuttavat ulkoiset kuormitukset ja jäännösjännitykset. Koska putki vaurioituu juuri eripariliitoshitsin kohdalla eikä muualla putkessa, ulkoiset kuormitukset eivät ole merkittävä tekijä, joka saa putken säröilemään, poikkeuksena sattumat. Kuten aikaisemmin myös mainittiin, jännityskorroosiota voi esiintyä ilman ulkoisia kuormituksia. Hitsauksesta syntyneet jäännösjännitykset ovat merkittävän suuria, ja niiden takia jännityskorroosiolle altis hitsin dendriittirakenne altistuu voimakkaasti jännityskorroosiolle korkealämpöisessä reaktorivedessä.

Hitsiyhteiden vaurioitumisessa syntyy mielikuva sattumasta, eli dokumentoimattomasta ja tunnistamattomasta syystä. Vaurioilla voisi olla yhteys esimerkiksi dokumentoimattomiin valmistuksen aikaisiin korjauksiin. Hitsien korjaukset valmistuksen yhteydessä muuttavat jäännösjännitystilaa. Sattumanvarainen, osin tunnistamaton syy yhteessä voisi olla ennakoimattomat kuormitukset, jotka voivat johtaa säröilyyn. Esimerkiksi putken linjaus verrattuna reaktoripaineastiaan voi muuttua, kun laitoksen osat liikkuvat ajan saatossa. Reaktoripaineastia nousee ylöspäin, kun betoni turpoo ja tämän takia se nostattaa putkia suhteessa ympärillä olevaan suojarakennukseen kuormittaen niitä.

Eripariliitoshitsiä valmistettaessa syntyy virheitä, jolloin materiaalista löytyy säröjä jo ennen kuin se on käytössä laitoksella. Jännityskorroosio voi siis käynnistyä näistä vioista ja päästä etenemään nopeasti. Isot valmistusvaiheen säröt havaitaan tarkastuksissa, ja osia ei oteta käyttöön sellaisinaan. Jännityskorroosio ei vaadi materiaalissa valmiiksi olevia vikoja esiintyäkseen, mutta alkuvika voi nopeuttaa särön etenemistä huomattavasti.

Reaktoriveden sähkönjohtavuuden ja sähkökemiallisen potentiaalin optimoinnin on havaittu olevan hyvä keino jännityskorroosioalttiuden pienentämisessä. Vesikemian arvojen optimoiminen annettujen ohjeiden mukaan muokkaa ympäristöä niin, että se ei altistakaan

materiaalia jännityskorroosiolle. Tämä myös hidastaa säröilyn etenemistä mahdollisen jännityskorroosion jo esiintyessä.

Säröilyn käynnistymisen ja kiihtymisen eriparihitseissä taustalla merkittäviä tekijöitä ovat jännityskorroosiolle altis Inconel 182, hitsauksen jäännösjännitykset, valmistuksen aikaiset viat, reaktoriveden epäpuhtaudet, sähkökemiallinen potentiaali sekä yhteen hitsattujen metallien erilaiset mekaaniset ja metallurgiset ominaisuudet. Mitigoimalla näiden tekijöiden vaikutusta jännityskorroosion esiintymistodennäköisyyttä ja kasvunopeutta voidaan merkittävästi pienentää. Muita merkittäviä tekijöitä voivat olla odottamattomat sattumat, joilta ei aina pystytä välttymään.

5 Mitigaatiomenetelmät

Erilaisia mitigaatiomenetelmiä käytetään jännityskorroosion estämiseksi ja sen vaikutusten lieventämiseksi. Jännityskorroosiota esiintyy vain, kun kaikki jännityskorroosiolle altistavat tekijät eli altis ympäristö, altis materiaali ja tarpeeksi suuri vetojännitys esiintyvät yhtä aikaa. Jännityskorroosioalttius voidaan siis poistaa vaikuttamalla yhteen tai useampaan näistä tekijöistä.

5.1 Vetyvesikemia

BWR-laitoksella käytetty jäähdytysvesi on happipitoista ja sen korroosipotentiaali korkea [54]. Korroosipotentiaalia saadaan kuitenkin laskettua puuttamalla vesikemiaan. Vetyvesikemia (engl. *hydrogen water chemistry*, HWC) on yleisesti käytetty menetelmä jännityskorroosion ehkäisemiseksi. GE Vernova Hitachi Nuclear Energy kehitti vetyvesikemian ja toimittaa vetyvesikemian hallitsemiseen tarvittavia resursseja [101]. Menetelmässä vetyä lisätään veteen jännityskorroosioalttiuden pienentämiseksi. Vety reagoi radiolyysissä syntyneiden hapettavien aineiden, kuten hapen (O_2) ja vetyperoksidin (H_2O_2), kanssa, jolloin ympäristö muuttuu vähemmän hapettavaksi ja sähkökemiallinen potentiaali laskee. [3] Sekä laboratorio- että kenttäolosuhteissa on havaittu särön kasvunopeuden pienenevän merkittävästi, kun normaalin vesikemian sijasta hyödynnetään vetyvesikemiaa. [56] Todennäköisyys säröilyn alkamiselle ja etenemiselle pienenee huomattavasti, jos materiaalin sähkökemiallinen potentiaali laskee alle -230 mV standardivetyelektrodin (*Standard Hydrogen Electrode potential scale*, SHE) potentiaaliin verrattuna [3].

Taulukkoon 5 on merkattu kiehumisvesilaitoksen reaktoriveden tyypilliset olosuhteet normaalissa vesikemiassa ja vetyvesikemiassa. Vesikemian arvot vaihtelevat erilaisien transienttien eli ohimenevien tilojen takia, esimerkiksi laitoksen ylös- ja alasajoissa sekä käytön aikaisissa sattumissa. Transientit saattavat vaikuttaa särön kasvuun [102].

Taulukko 5. BWR-reaktoriveden olosuhteet normaalissa vesikemiassa ja vetyvesikemiassa. Muokattu lähteestä [4] lukuunottamatta syötettävän vedyn määrä, joka on lähteestä [3].

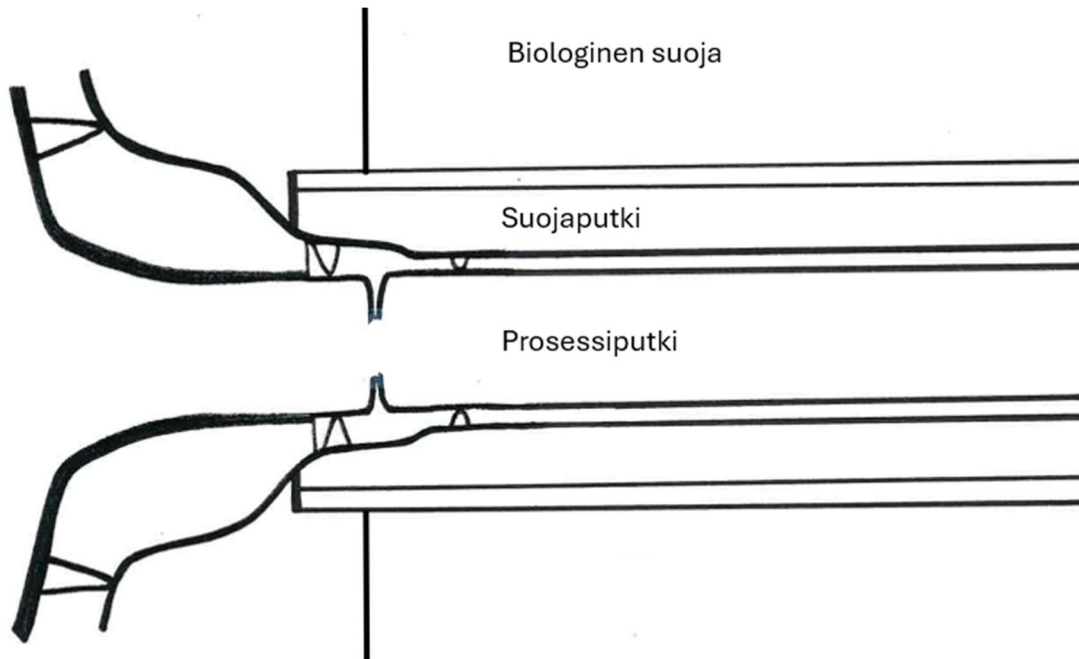
| Parametri | NWC | HWC |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Lämpötila | 285–288 °C | |
| pH (285°) | 5,7 | |
| Radiolyysisuotteet | O_2, H_2O_2 | H_2 |
| ECP | ~ 150 mV _{SHE} | ≤ -230 mV _{SHE} |
| Syötettävän vedyn määrä | - | 0,3–2,5 ppm |

Vetyvesikemialla on myös mahdollisia haittavaikutuksia. Vedyn lisäys reaktoriveteen vaikuttaa eri tavalla reaktorin eri osissa. Vedyn lisääminen veteen muun muassa nostaa säteilytasoja päänhöyrylinjassa [3]. Säteilytasojen nousu ei ole tietenkään toivottavaa, koska se nostaa työntekijöiden säteilyannoksia altistaen terveyshaitoille ja voi altistaa materiaalin vaurioille.

5.2 Korjausmenetelmät

Reaktoripaineastian yhteen korjaus on haastava prosessi, joka vaatii tarkan korjaussuunnitelman ja osaavat henkilöt. Koneistus, hitsaus ja tarkastukset tulee suorittaa oikeilla ja pätevöidyillä menetelmillä oikea-aikaisesti. Aikaisemmin havaitut indikaatiot voivat paljastua korjauksen yhteydessä huomattavasti suuremmiksi kuin määräaikaistarkastuksissa. Yhteiden ennakoivat korjaukset vievät paljon aikaa verrattuna syvien säröjen korjauksiin. Syvän särön korjaukselle ei ole valmista korjauskonseptia, kuten ennakoiville määräaikaistarkastuksille [86].

Yhteen korjaus voidaan suorittaa putken sisä- tai ulkopuolta, joko reaktoripaineastian puolelta tai biologisen suojan ulkopuolelta. Jännityskorroosioalttiin materiaalin korvaaminen ja käsittely ei ole helppoa, koska yhde sijaitsee ahtaassa ja korkeasti säteilevässä paikassa. Ihminen ei voi siis suorittaa korjausta manuaalisesti vaan tarvitaan korjaukseen kehitettyjä laitteita, jotka suorittavat korjauksen. Laitoksien rakennusvaiheessa hitsaus on voitu tehdä vielä manuaalisesti, koska säteilyä ennen energiantuotantoprosessin aloittamista ei tietenkään ollut. Jos korjaus tehdään biologisen suojan puolelta, yhde tulpataan reaktoripaineastian puolelta. Tämän jälkeen putki katkaistaan biologisen suojan ulkopuolelta, jotta hitsiliitoksen luo päästään. Jos korjaus suoritetaan reaktoripaineastian sisäpuolelta, reaktoripaineastiaan asennetaan uppoarkku, jonka kautta työvälineet saadaan yhteen luo. Korjauksessa käytettävät hitsaus- ja koneistuslaitteet korjaavat hitsiyhteen putken sisä- tai ulkopuolelta. [86] Kuva 16 havainnollistaa putken sijaintia biologinen suoja ja suojaputki ympärillään. Hitsin korjaus muuttaa yhteessä vaikuttavia jäännösjännityksiä.



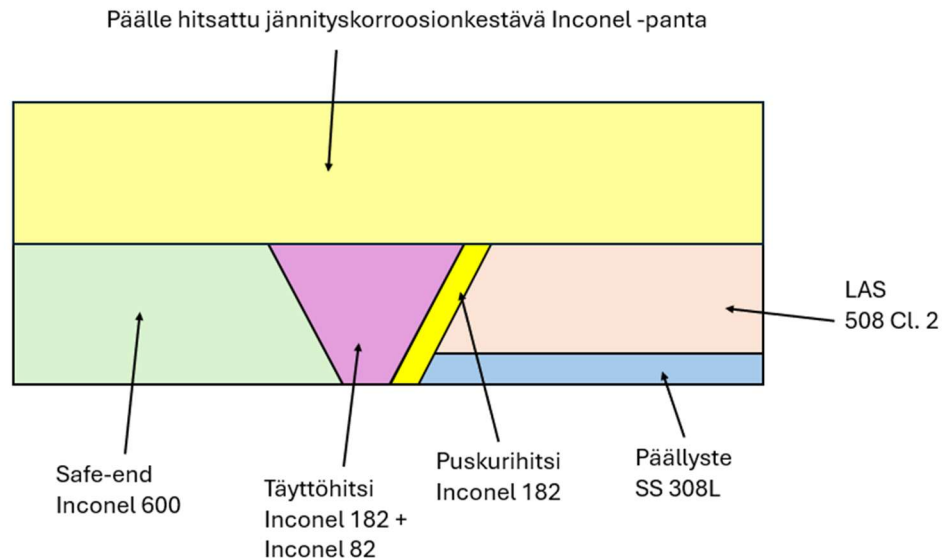
Kuva 16. Hitsiliitos sijaitsee ahtaissa tiloissa biologisen suojan ympäröimänä. Prosessiputkea ympäröi suojaputki. Hitsiliitosta voidaan lähestyä reaktoripaineastian sisäpuolelta tai biologisen suojan ulkopuolelta. Kuva perustuu lähteeseen [86].

2000-luvulla Inconel 690/152/52/52M -materiaaleja on käytetty Inconel 600/182/82 sijasta. Kiehuvesilaitoksella myös Inconel 82 on ollut yleinen yhteiden korjauksessa käytetty materiaali [56]. Inconel 82 on käytetty pinnoittamaan yhdehitejä, joissa on ollut jännityskorroosiolle hyvin altista Inconel 182 -materiaalia [4]. TVO:lla Inconel 52 ja 52M on hyödynnetty kiehuvesilaitoksen yhteiden korjauksissa. Yhdehitsin korjaus voidaan suorittaa hitsaamalla uutta materiaalia putken ulkopuolelle tai sisäpuolelle tai valmistamalla täysin uudet hitsiliitokset. Korjausprosessin jälkeen korjattu hitsi tarkastetaan silmämääräisesti ja NDT-tarkastuksilla [86].

5.2.1 Yhteen ulkopinnan päällehitsaus

Yhteen päällehitsaus ulkopuolelta on yleisesti käytetty menetelmä yhdysvaltalaisilla painevesilaitoksilla. Putken ulkopuolta hitsattaessa putken koko kehä päällystetään uudella jännityskorroosionkestävällä materiaalilla (*overlay/external onlay*) ja vika jää rakenteeseen hitsipinnan sisälle. [58] Kuvassa 17 näkyy yhteen rakenne putken ulkopuolisen päällystehitsin valmistamisen jälkeen. Hitsiliitoksen päällystävän hitsin avulla voidaan muuttaa alkuperäisessä hitsissä olleet vetojäännösjännitykset puristusjännityksiksi tai niiden kuormittavuutta voidaan huomattavasti pienentää [103]. Uusi hitsikerros aiheuttaa rakenteeseen kutustumista, joka synnyttää jäännösjännityksiä. Puristavia jännityksiä saadaan putken sisäpintaan, jolloin ne voivat hidastaa tai pysäyttää särön kasvun ja suojata rakennetta uusien säröjen

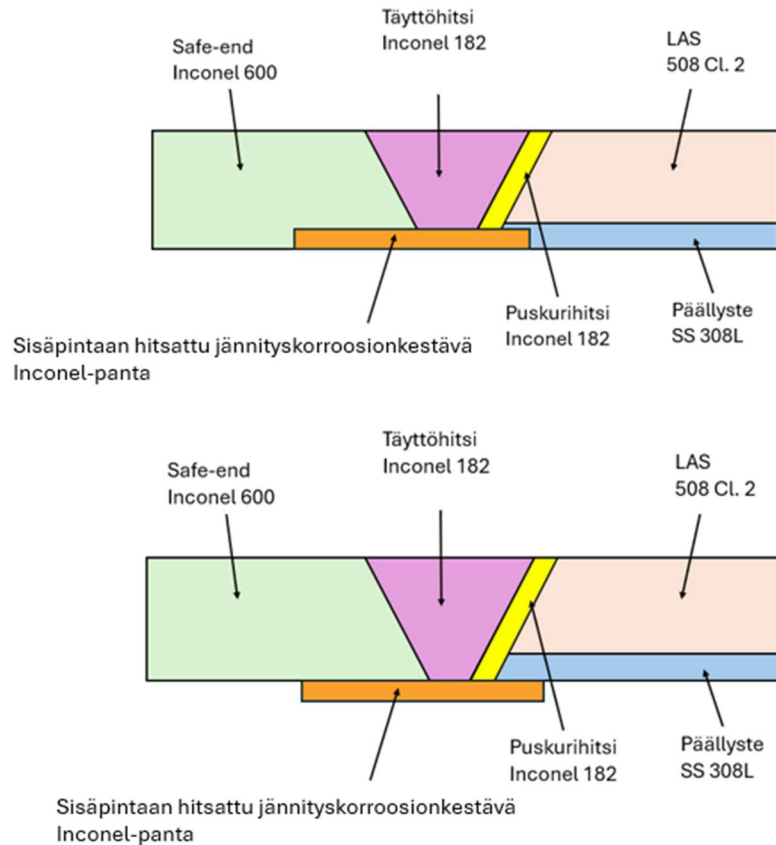
muodostumiselta. Korjaustyö perustuu ASME:n Code Cases N-740 ja N-754 ohjeistuksiin [58]. Menetelmä helpottaa korjaustyötä, kun yhteen sisäpuolelle ei tarvitse tehdä toimenpiteitä ja vanhaa materiaalia ei ole pakko poistaa [86].



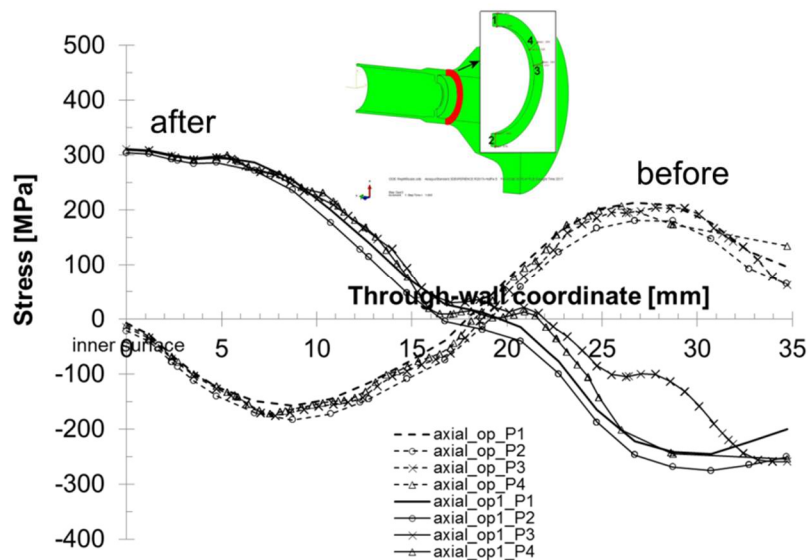
Kuva 17. Putken ulkopuolelle hitsiyhteen päälle on hitsattu jännityskorroosionkestävä materiaali säröilyn ehkäisemiseksi. (*overlay/external onlay*)

5.2.2 Yhteen sisäpinnan pinnoitushitsaus

Putken sisäpintaa suojaavan hitsipannan valmistuksessa putken sisäpintaan hitsataan jännityskorroosionkestävää materiaalia. Eripariliitoshitsistä koneistetaan ensin vanhaa materiaalia pois ja putken sisälle hitsataan uusi materiaali. Koko hitsiä ei korjata vaan vain pieni kerros Inconel 182 -hitsiä poistetaan ja tilalle hitsataan jännityskorroosionkestävää materiaalia. Se hitsataan putkeen yhtenäisenä pantana, jolloin se suojaa Inconel 182 -hitsiä vesiympäristöltä. Lopuksi pinta koneistetaan, jolloin se on tasainen (*inlay*). Hitsipanta voidaan myös hitsata yhteen sisäpintaan niin, että se ei sulaudu tasaisesti putken pintaa vaan ulkonee siitä (*onlay/internal onlay*). Kuvassa 18 on esitetty mahdolliset sisäpinnan pinnoitusmenetelmät. Korjausprosessi perustuu ASME Code Case N-766. [58] Kuvassa 19 on esitetty yhteen sisäpinnan päällystämistä aiheutuneet aksiaalisen jännityksen muutokset hitsin seinämän läpi. Seinämän sisäosan puristusjännitykset muuttuvat vetojännityksiksi ja ulkoseinämän vetojännitykset muuttuvat puristusjännityksiksi. Tämä voidaan hyväksyä, koska korjausmateriaali ei ole jännityskorroosioherkkä.



Kuva 18. Putken sisäpuolelle yhdehitsin pinnalle on hitsattu jännityskorroosionkestävä materiaali säröilyn ehkäisemiseksi. Sisäpinnan päällyste voidaan hitsata niin, että se sulautuu materiaaliin (*inlay*) tai se ulkonee siitä (*onlay/internal onlay*).



Kuva 19. Aksiaaliset jännitykset ennen yhteen korjausta ja sen jälkeen. Putken sisäpintaan uuden materiaalin takia seinämän sisäosan puristavat jännitykset muuttuvat vetojännityksiksi ja ulkoseinämän vetojännitykset muuttuvat puristusjännityksiksi. Vetojännitykset ovat positiivisia arvoltaan ja puristusjännitykset negatiivisia. Lainattu lähteestä [93] Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy ja Teollisuuden Voima Oyj luvalla.

6 Kirjallisuuskatsaus

Työn aikana kerätyt asiakirjat jännityskorroosiosta on taulukoitu ja kerätty Liitteeseen 1 "Kootut jännityskorroosioasiakirjat". Asiakirjat on lajiteltu TVO:n arkistoista löytyneisiin asiakirjoihin. Teknologian tutkimuskeskuksen (VTT) asiakirjoihin ja netistä löytyneisiin julkisiin lähteisiin. Eri asiakirjojen sisällöstä on annettu lyhyet kuvaukset taulukossa. Liite 1 on luottamuksellinen.

TVO:n laitoksilla jännityskorroosion aiheuttamiin yhteiden säröihin liittyviä asiakirjoja löytyy jo 1980-luvulta. Ongelma on siis tiedostettu hyvin pitkään, ja se vaatinut erilaisia varautumiskeinoja. Aiheeseen liittyviä asiakirjoja ja tutkimuksia on suuri määrä, ja ne sisältävät arvokasta tietoa yhteiden jännityskorroosiosta. VTT on osallistunut useisiin tutkimuksiin, joita TVO on teettänyt. Asiakirjat reaktoripaineastian yhteen jännityskorroosiosta ovat sisältäneet muun muassa

- kirjallisuuskatsauksia muilla laitoksilla esiintyneistä jännityskorroosiotapauksista
- lujuuslaskennallisia tarkasteluja hitsiyhteistä ja hitsauksen vaikutuksista
- TVO:n hitsiyhteiden korjaustekniikkaan liittyviä asiakirjoja
- analyysejä särökoista, säröjen synnystä ja säröjen etenemisestä
- asiakirjoja määräaikaistarkastuksista ja indikaatioista
- asiakirjoja vesikemian säätelyn vaikutuksesta

Jännityskorroosioon liittyen on käynnistetty useita projekteja, joista on saatu kattavaa tutkimustietoa yhteiden säröilystä ja alttiudesta siihen. Jännityskorroosion monimutkaisuuden ja monien eri vaikuttavien tekijöiden takia, tarvitaan monipuolisia tutkimuksia ja tarkasteluja. Näiden tutkimusten tulokset tarjoavat keinoja esimerkiksi jännityskorroosion aiheuttamien säröjen ennaltaehkäisemiseen, särön etenemisen analysointiin ja säröjen korjaukseen.

Jännityskorroosiosta on aikaisemminkin tehty diplomitöitä TVO:lla. Kari Hukkasen diplomityö "*Ydinvoimalaitoksen reaktoripaineastian yhteiden eriparihitsien tarkastus- ja korjausstrategioista*" käsittelee muun muassa yhteiden optimaalisia peruskorjausaikatauluja ja aikataulujen vaikutusta tarkastustaaajuuteen. Työstä saatujen tulosten perusteella suositeltiin yhteiden hitsien korjauspinnoitusten aloittamista vuonna 2005. Yhteitä ei kuitenkaan alettu

tällöin vielä korjata. Ari Jennin (nykyään Kuuslaakso) diplomityö "*Ydinvoimalaitoksen reaktoripaineastian yhteen eriparihitsausliitoksen ultraäänitarkastuksen parantaminen*" käsittelee vaiheistetun ultraäänitarkastuksen soveltuvuutta vian koon selvittämiseen Inconel 182 -hitsissä. Työssä todetaan, että särökokojen kasvun ennustaminen on haastavaa ja validoinnin tarvetta olisi hyvä arvioida erikseen jokaisen luonnolliseen särön kasvuun perustuvan vian valmistusmenetelmän yhteydessä. Petra Holmströmin diplomityö "*The effect of mismatch on the mechanical properties of a dissimilar metal weld*" käsittelee eripariliitoshitsin materiaalien lujuuksien epäyhteensopivuutta ja sen vaikutusta murtumiskäyttäytymiseen.

Kesäkuussa 2017 OL2-laitosyksiköllä suoritettiin reaktoripaineastian yhteiden korjaustyö kahdelle yhteelle. Ennen korjaustyötä tehtiin tutkimuksia, joissa simuloitiin korjausprosessin vaikutuksia yhteeseen. VTT:n tutkimuksissa syöttövesiputken ulkopuolen päällystämisen uudella hitsillä todettiin olevan huono korjausmenetelmä syvän aksiaalisen särön korjauksessa. Riski särön kasvulle kasvoi hitsauksen aikana ja sen jälkeen suoritettujen simulaation perusteella. [104] Putken sisäpuoleisen korjauksen havaittiin vähentävän rakenteen vetojännityksiä, joten korjauksissa käytettiin tätä menetelmää. Myös sydämenruiskutusjärjestelmän yhteelle tehtiin korjaus. [93] Molemmissa korjauksissa määräaikaistarkastuksissa havaitut indikaatiot osoittautuivat pienemmiksi kuin korjauksen jälkeen saadut indikaatiot jäljelle jääneistä säröistä. Korjauksen aikana saadut indikaatiot olivat todennäköisesti suurempia, koska korjauksen aikainen hitsauksen lämmöntuonti saattoi avata jännityskorroosiosäröjä. Näiden korjausten jälkeen vielä 18 yhdettä on korjaamatta OL1- ja OL2-laitoksilla. [86]

Jännityskorroosioilmiö kevytvesireaktoreiden hitsiyhteissä on perusongelma, joka voi johtaa laitoksen käytön pysäyttämiseen. OL1- ja OL2-laitoksilla ongelmaan on varauduttu tekemällä yhteiden määräaikaistarkastuksia tiheämmin kuin normaalien aikataulujen mukaisesti tehtäisiin [86]. Näin seurataan, että särö ei pääsisi läpäisemään putkea aiheuttaen vuodon. Määräaikaistarkastuksista saadut indikaatiot voivat kuitenkin olla todellisuudessa suurempia, joten pelkkä tarkastusten lisääminen ei ole täysin luotettava keino välttää vuodoilta. Siksi korjausvalmiuden suunnittelu ja kehittäminen voisi olla hyvä seuraava askel ongelman käsittelyssä.

Inconel 182 -materiaalin lisäksi muiden hitsiyhteissä käytettyjen materiaalien mahdollisesta jännityskorroosioalttiudesta on tehty lukuisia tutkimuksia. Hitsiyhteiden lisäksi jännityskorroosiota esiintyy myös muissa laitoksen rakenteissa. Korkeahiilisten

ruostumattomien terästen jännityskorroosio on tällä hetkellä paremmin tunnettu ilmiö kuin Inconel 182 jännityskorroosio. Tämä työ ei kuitenkaan ole kaikenkattava katsaus kaikkiin mahdollisesti jännityskorroosioalttiisiin materiaaleihin tai rakenteisiin, vaan se rajattiin perehtymään juuri Inconel 182 -materiaalin säröytymiseen kiehutusvesilaitoksen reaktoripaineastian läpivienneissä jännityskorroosion vaikutuksesta.

7 Päätelmät

Tämä tutkielma käsittelee jo pitkään kevytvesijäähdytteisillä laitoksilla esiintynyttä jännityskorroosio-ongelmaa. Reaktoripaineastian yhteet ovat turvallisuuskriittisiä osia, joiden vaurioituminen ei ole toivottavaa. Valitettavasti OL1- ja OL2-laitoksia sekä monia muita laitoksia suunniteltaessa ja rakentaessa ongelmaa ei osattu ennakoita ja jännityskorroosion esiintymiselle luotiin suotuisat puitteet. Vaurioiden tutkiminen ja korjaaminen on tuottanut paljon ylimääräisiä kuluja. Sattuneista vaurioista on kuitenkin otettu oppia ja uudemmat laitokset, kuten Olkiluoto 3, rakennetaan nykyään hyödyntäen parempia materiaaliratkaisuja. Vanhemmilla laitoksilla ongelma on kuitenkin merkittävä yhä edelleen.

Jännityskorroosion syntyyn vaikuttavat samaan aikaan useat eri tekijät, joiden vaikutuksen merkittävyyttä ei aina osata arvioida oikein. Jännityskorroosiolle altis materiaali, korroosiolle altistava ympäristö ja vetojännitykset vaikuttavat samaan aikaan ja eri tekijöiden suhteellinen merkitys vaihtelee eri vauriotapauksissa. Jännityskorroosiolle ei ole yksiselitteistä syntymekanismia, jolla kaikkia jännityskorroosioilmiöitä voidaan selittää. Tämä vaikeuttaa ongelman ratkaisua. On havaittu, että reaktoripaineastian yhteeseen vaikuttaa merkittävän suuria hitsauksen jäännösjännityksiä, eikä kiehutusvesilaitoksen reaktorivesi epäpuhtauksineen ja aikanaan yhteisiin valitut materiaalit ole hyvä yhdistelmä. Joissain tapauksissa jännityskorroosion esiintyessä materiaaliin ei ole kohdistunut ulkoisten kuormien aiheuttamia jännityksiä ja jännityskorroosio on silti päässyt etenemään. Kyseessä täytyy olla siis jäännösjännitykset, jotka altistavat säröilylle. Hitsauksen jäännösjännitysten varmistettiin olevan merkittävässä asemassa jännityskorroosion muodostumisessa kappaleen 4.2.2 lukuunlaskelmilla. Yhteissä kulkeva vesi on korkeasti happipitoista, korkealämpöistä ja sisältää epäpuhtauksia. Olosuhteet altistavat yhteen jännityskorroosiolle, jos vesi on kosketuksissa jännityskorroosiolle alttiin materiaalin kanssa. Näin on päässyt käymään vanhemman sukupolven laitoksilla.

Yleinen yhteiden liitoshitseissä käytetty nikkelpohjainen materiaali Inconel 182 on erityisen altis jännityskorroosiolle ja kyseisessä materiaalissa on esiintynyt monia säröilytapauksia ydinvoimalaitoksilla. Laitosten suunnitteluvaiheessa sen oletettiin olevan jännityskorroosionkestävä käyttöolosuhteissa, mutta myöhemmin säröilyn ilmestyessä havaittiin, että näin ei olekaan. Uuden sukupolven laitoksissa rakentamisessa ja vanhojen laitosten säröilevien yhteiden korjauksissa on alettu käyttää muita Inconel-materiaaleja, joilla on korkeampi kromipitoisuus ja täten ne kestävät paremmin jännityskorroosiota. Pelkkä

materiaalivalinta ei välttämättä tee siitä jännityskorroosiolle altista. Materiaalin käsittely, kuten hitsaus ja lämpökäsittelyn puuttuminen, muokkaa sen mikrorakennetta ja aiheuttaa jännityksiä vaikuttaen merkittävästi sen jännityskorroosioherkkyyteen. Materiaali ei siis välttämättä ole jännityskorroosiolle altis käyttöolosuhteissa, mutta sen virheellinen käsittely voi tehdä siitä alttiin.

Yhteille tehtävillä määräaikaistarkastuksilla tutkitaan materiaalia ja siihen mahdollisesti syntyneitä vikoja. Rikkomattomat tarkastukset voivat kuitenkin hämätä ja luottaminen sokeasti pelkästään niiden tuloksiin ei kannata. Koska materiaalin rakennetta ei rikota ja siinä oleviin säröihin ei päästä suoraan käsiksi tarkastusten yhteydessä, tulokset voivat olla epäluotettavia ja saatu indikaatio ei vastaakaan todellista materiaalissa piilevää vauriota. Tällöin särö voi päästä etenemään liian pitkälle aiheuttaen vuodon, jolloin laskentaan perustuva varautuminen ennalta ei enää auta ja täytyy ruveta todella haastaviin korjaustöihin. Ennakoivilla korjaustoimenpiteillä voidaan välttää särön eteneminen syvälle rakenteeseen.

Laitosten ikääntyminen tuottaa ongelmia, koska pitkään käytössä olleet materiaalit ovat edelleen riskikohde ja vaurioituvat muun muassa jännityskorroosion vaikutuksesta. Jännityskorroosioilmiön tutkimus ja sen ymmärrys on kehittynyt huomasti laitosten käytön aikana ja ongelman ratkaisemiseksi on kehitetty erilaisia menetelmiä, kuten vetyvesikemia ja materiaalien korvaaminen kestävämmillä materiaaleilla. Nämä menetelmät eivät kuitenkaan tarjoa yksinkertaisia ja edullisia ratkaisuja ongelmaan. Paras keino ongelman ratkaisemiseksi voi olla tapauskohtainen ja yhdellä laitoksella toimivaksi katsottu keino ei välttämättä toimi toisella laitoksella. Tietoa ja osaamista jännityskorroosiosta reaktoripaineastian yhteiden eripariliitoshitseissä tulee kehittää jatkossakin.

Varautuminen ongelmaan on kannattavaa, jotta laitoksia voidaan käyttää taloudellisesti ja turvallisesti niiden käyttöään loppuun asti, ja pitkät käyttökätkot ja suuret taloudelliset tappiot voidaan välttää. Ruotsissa Oskarshamn 3 -laitoksella sattunut vuoto on varoittava esimerkki siitä, kuinka jännityskorroosio voi aiheuttaa odottamattoman ja pitkän käyttökätkon. Jännityskorroosio voi päästä yllättämään, vaikka tehdyt tarkastukset ja tutkimukset näyttäisivät yhteen säilyvän käyttökuntoisena vielä pitkiäkin aikoja. Ongelmaan varautuminen korjausvalmiutta suunnittelemalla ja kehittämällä voisi olla hyvä keino varmistaa, että jännityskorroosion aiheuttamilta vuodoilta voidaan välttyä OL1- ja OL2-laitoksilla.

Lähteet

- [1] H. Hamdan, A. Alsit, A. B. Al Tahhan, O. Mughieda, A.-H. I. Mourad, M. A. Shehadeh and M. Alkhedher, "Prognosis methods of stress corrosion cracking under harsh environmental conditions," *Heliyon*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25276>
- [2] A. A. Amiri, I. U. Toor ja A. Shams, "Understanding Stress Corrosion Cracking (SCC), Affecting Variables and Prevention Strategies in Nuclear Power Plants—A Review," *Arabian Journal for Science and Engineering*, osa/vuosik. 50, nro 5, pp. 2957-2990, 2025. DOI:10.1007/s13369-024-09241-w
- [3] I. Atomienergie-Organisation, Stress corrosion cracking in light water reactors: good practices and lessons learned, Wien: IAEA, 2011.
- [4] J. Öijerholm ja A. Jenssen, "Interkristallin spännings korrosion i nickelbas legeringar i BWR- och PWR-miljö," Studsvik Nuclear AB, 2021.
- [5] Q. M. Z. Shah, "Corrosion Failures in the Nuclear Power Plant," tekijä: *Industrial Corrosion: Fundamentals, Failure, Analysis and Prevention*, Wiley, 2025, pp. 277-295. DOI:10.1002/9781394301560.ch12
- [6] D. Fischer, History of the International Atomic Energy Agency, the First Forty Years, Vienna: International Atomic Energy Agency, 1997.
- [7] Säteilyturvakeskus STUK, "Tietoa ydinjätteistä," Säteilyturvakeskus STUK, [Online]. Saatavilla: <https://stuk.fi/tietoa-ydinjatteista>. [Haettu 11 11 2025].
- [8] "Loppusijoitusratkaisu," Posiva, [Online]. Saatavilla: <https://www.posiva.fi/loppusijoitusratkaisu.html>. [Haettu 10 2 2026].
- [9] "Kauppalehti," [Online]. Saatavilla: <https://www.kauppalehti.fi/yritykset/yritys/01966560>. [Haettu 26 9 2025].
- [10] Teollisuuden Voima Oyj TVO, "Olkiluodossa tuotettiin vuonna 2025 noin neljäsosa Suomen sähköstä," Teollisuuden Voima Oyj TVO, 6 1 2026. [Online]. Saatavilla: <https://www.tvo.fi/ajankohtaista/tiedotteetporssitiedotteet/2026/olkiluodossatuotettiinvuonna2025noinneljasosasuomensahkosta.html>. [Haettu 19 1 2026].
- [11] "OL1 ja OL2," Teollisuuden Voima Oyj, [Online]. Saatavilla: <https://www.tvo.fi/tuotanto/laitosyksikot/ol1jaol2.html>. [Haettu 3 10 2025].
- [12] Teollisuuden Voima Oyj, "OL1 & OL2 Ydinvoimalaitosyksiköt," Teollisuuden Voima Oyj, Helsinki, 2013.

- [13] Työ- ja elinkeinoministeriö, ”Olkiluoto 1- ja Olkiluoto 2-laitosyksiköt ovat tuottaneet sähköä jo yli 40 vuoden ajan,” Työ- ja elinkeinoministeriö, [Online]. Saatavilla: <https://tem.fi/olkiluoto-ol1-ja-ol2>. [Haettu 12 12 2025].
- [14] Työ- ja elinkeinoministeriö, ”Olkiluodon ydinvoimalaitoksen ympäristövaikutusten arviointimenettelyn YVA-ohjelma,” Työ- ja elinkeinoministeriö, [Online]. Saatavilla: <https://tem.fi/olkiluoto-ol1-ja-ol2-yva-ohjelma>. [Haettu 12 12 2025].
- [15] ”Rakenne ja tekniset tiedot,” Teollisuuden Voima Oyj TVO, [Online]. Saatavilla: <https://www.tvo.fi/tuotanto/laitosyksikot/ol1jaol2/rakennejateknisetiedot.html>. [Haettu 16 10 2025].
- [16] ”OL3,” Teollisuuden Voima Oyj, [Online]. Saatavilla: <https://www.tvo.fi/tuotanto/laitosyksikot/ol3.html>. [Haettu 3 10 2025].
- [17] VTT Technical Research Centre of Finland, ”Forum for the Effect of Thermal Aging and Microstructure on Mechanical and EAC Behaviour of Ni-base Alloy Dissimilar Metal Welds (FEMMA),” VTT Technical Research Centre of Finland, 2023.
- [18] ”Perustietoa Olkiluoto 3:sta Toimintaperiaate, käyttö, turvallisuus,” Teollisuuden Voima Oyj TVO, Eurajoki, 2009.
- [19] F. Bass, ”European Pressurized Reactors (EPRs),” The Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA), 2003.
- [20] ”Nuclear Power Reactors,” World Nuclear Association, 5 12 2025. [Online]. Saatavilla: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors#main-types-of-nuclear-reactor>. [Haettu 12 12 2025].
- [21] ”Ydinvoimalaitostyyppit,” Säteilyturvakeskus STUK, [Online]. Saatavilla: <https://stuk.fi/ydinvoimalaitostyyppit>. [Haettu 14 10 2025].
- [22] E. Siegfried, ”A complicated way of boiling water: nuclear safety in water history,” *Water History*, pp. 331-344, 2020.
- [23] Teollisuuden Voima Oyj, ”Käyttölupahakemus, Liite 6,” Teollisuuden Voima Oyj, Olkiluoto, 2017.
- [24] M. Wang, B. Wang, X. Guo, J. Zhang, Z. Chao, Y. Wang, C. Lu, Y. Wu ja R. Tian, ”Review on the steam-liquid separation in the steam generator of nuclear power plants,” Elsevier, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109207>
- [25] ”Ydinsähköä Olkiluodosta,” Teollisuuden Voima Oyj TVO, Helsinki, 2012.
- [26] ”Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3,” Teollisuuden Voima Oyj, Helsinki, 2008.
- [27] S. STUK, ”Ydinlaitoksen ikääntymisen hallinta YVL A.8,” Stuklex, 15 2 2019. [Online]. Saatavilla: <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLA-8>. [Haettu 27 10 2025].

- [28] M. Hämäläinen, ”Suomen ydinmateriaaleja valvovat STUK, IAEA ja Euratom,” Säteilyturvakeskus STUK, 5 5 2023. [Online]. Saatavilla: <https://stuk.fi/-/marko-hamalainen-suomen-ydinmateriaaleja-valvovat-stuk-iaea-ja-euratom>. [Haettu 9 10 2025].
- [29] International Atomic Energy Agency IAEA, ”Publications,” International Atomic Energy Agency IAEA, [Online]. Saatavilla: <https://www.iaea.org/publications>. [Haettu 29 10 2025].
- [30] ”Memorandum of Understanding Between the U.S. Nuclear Regulatory Commission and the Electric Research Institute,” Federal Register, [Online]. Saatavilla: <https://www.federalregister.gov/documents/2016/12/21/2016-30739/memorandum-of-understanding-between-the-us-nuclear-regulatory-commission-and-the-electric-power>. [Haettu 30 9 2025].
- [31] ”About EPRI,” Electric Power Research Institute, [Online]. Saatavilla: <https://www.epri.com/about>. [Haettu 29 9 2025].
- [32] ”History of ASME Standards,” The American Society of Mechanical Engineers, [Online]. Saatavilla: <https://www.asme.org/codes-standards/about-standards/history-of-asme-standards>. [Haettu 29 9 2025].
- [33] The American Society of Mechanical Engineers ASME, ”Resources for the nuclear industry,” [Online]. Saatavilla: <https://www.asme.org/wwwasmeorg/media/resourcefiles/shop/standards/new%20releases/nuclear-resources-brochure.pdf>.
- [34] ”Ydinenergialainsäädäntö kattaa ydinenergian käytön koko elinkaaren turvallisuuden,” Työ- ja elinkeinoministeriö, [Online]. Saatavilla: <https://tem.fi/ydinenergialainsaadanto>. [Haettu 22 10 2025].
- [35] ”Ydinenergian ylin johtaminen ja valvonta kuuluvat työ- ja elinkeinoministeriölle,” Työ- ja elinkeinoministeriö, [Online]. Saatavilla: <https://tem.fi/ydinenergihallinto>. [Haettu 9 10 2025].
- [36] Säteilyturvakeskus, ”Säteilytoiminnan turvallisuus,” Säteilyturvakeskus, Helsinki, 2013.
- [37] ”Ydinturvallisuusohjeet (YVL-ohjeet),” Säteilyturvakeskus, [Online]. Saatavilla: <https://stuk.fi/yvl-ohjeet>. [Haettu 29 9 2025].
- [38] J. Sandberg, Ydinturvallisuus, Säteilyturvakeskus ydinturvallisuuden valvojana, osa/vuosik. 10, Helsinki: Säteilyturvakeskus, 2004.
- [39] ”Ydinturvallisuudesta raportointi,” Säteilyturvakeskus STUK, [Online]. Saatavilla: Työ- ja elinkeinoministeriö TEM. [Haettu 7 10 2025].

- [40] T. Reiman, E. Pietikäinen ja P. Oedewald, Turvallisuuskulttuuri: teoria ja arviointi, Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, 2008.
- [41] ”Turvallinen toiminta,” Teollisuuden Voima Oyj, [Online]. Saatavilla: <https://www.tvo.fi/tuotanto/laitosyksikot/turvallintoiminta.html>. [Haettu 2 10 2025].
- [42] European Nuclear Society, ”Westinghouse, TVO and OKG Signed a Cooperation Agreement to Reinforce Key Competencies,” European Nuclear Society, [Online]. Saatavilla: <https://www.euronuclear.org/news/westinghouse-tvo-okg-agreement/>. [Haettu 13 11 2025].
- [43] S. STUK, ”Ydinlaitoksen painelaitteiden rikkomattomat määräaikaistarkastukset,” Stuklex, 15 2 2019. [Online]. Saatavilla: <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLE-5>. [Haettu 27 10 2025].
- [44] R.-W. Bosch, S. Ritter, M. Herbst, R. Kilian, M. G. Burke, J. Duff, F. Scenini, Y. Gu, A. Dinu, U. Ehrstén, A. Toivonen, R. Novotny, O. Martin, F.-J. Perosanz, A. Legat ja B. Zajec, ”Stress corrosion crack initiation testing with tapered specimens in high-temperature water—results of a collaborative research project,” *Corrosion Engineering, Science and Technology*, osa/vuosik. 56, nro 2, pp. 103-118, 17 02 2021. DOI: 10.1080/1478422X.2020.1815460
- [45] ”ADDENDUM to MEMORANDUM OF UNDERSTANDING between U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION and ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, INC. on COOPERATIVE NUCLEAR SAFETY RESEARCH,” U.S. Nuclear Regulatory Commission, Electric Power Research Institute, 2016.
- [46] ”Oskarshamn Nuclear Plant Shutdown Extended for Pipe Repair,” Sweden Herald, 13 08 2025. [Online]. Saatavilla: <https://swedenherald.com/article/oskarshamn-nuclear-plant-shutdown-extended-for-pipe-repair>. [Haettu 3 12 2025].
- [47] K. Suojanen, ”Näin vakava vuoto Ruotsin suurimmassa ydinvoimalassa korjattiin – 25 mm halkeama pysäytti tuotannon 7 kuukaudeksi,” Tekniikka & Talous, 22 12 2025. [Online]. Saatavilla: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/a/a51033d3-0fc4-4ac0-a5ff-8db1c5ec7aa5>. [Haettu 8 1 2026].
- [48] T. Pedersen, ”Technologies for improving the availability and reliability of current and future water cooled nuclear power plants, Designing for nuclear power plant maintainability and operability,” International Atomic Energy Agency, Argonne, 1997.
- [49] J. Föhl, ”Reactor pressure vessel design,” International Atomic Energy Agency (IAEA), 1998.
- [50] O. Cronvall, ”Susceptibility of boiling water reactor pressure vessel and its internals to degradation,” Aalto University, Helsinki, 2020.

- [51] O. Cronvall, "Long-term operation of a boiling water reactor pressure vessel and its internals," *Rakenteiden mekaniikka*, osa/vuosik. 52, nro 4, pp. 200-221, 2019.
<https://doi.org/10.23998/rm.76141>
- [52] R. Mougnot ja H. Hänninen, "Microstructures of nickel-base alloy dissimilar metal welds," Aalto University, Helsinki, 2013.
- [53] O. Cronvall ja H. Keinänen, "OL1/OL2 - RPV nozzle weld repair simulations - 312 nozzles, Rev. 2," Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 2017.
- [54] T. Kiesi, S. Lindqvist, E. Leskelä, V. Lindroos, R. Pohja, V. Rantanen, E. Salenius ja T. Sarikka, "Materials Science and Technology - Nuclear Materials, Advanced Course," tekijä: *Aalto University publication series SCIENCE + TECHNOLOGY*, H. Hänninen ja T. Kiesi, Toim., Helsinki, Aalto University, 2015, p. 117.
- [55] V. S. Raja ja T. Shoji, *Stress Corrosion Cracking : Theory and Practice*, Elsevier, 2011.
- [56] H. Hänninen, P. Aaltonen, A. Brederhol, U. Ehrnsten, h. Gripenberg, A. Toivonen, J. Pitkänen ja I. Virkkunen, "Dissimilar metal weld joints and their performance in nuclear power plant and oil refinery conditions," Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Helsinki, 2006.
- [57] A. Gupta, J. Singh ja R. Chhibber, "Dissimilar welding of austenitic and ferritic steels using nickel and stainless-steel filler: Associated issues," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, osa/vuosik. 238, nro 5, pp. 2524-2544, 2023. DOI:10.1177/09544089231159776
- [58] International Atomic Energy Agency IAEA, *Dissimilar Metal Weld Inspection, Monitoring and Repair Approaches*, Wien: International Atomic Energy Agency IAEA, 2018.
- [59] P. Nevasmaa, P. Holmström, P. Karjalainen-Roikonen, T. Sarikka, M. Ahonen, R. Mougnot, U. Ehrnsten, A. Brederholm, P. Aaltonen ja H. Hänninen, *Fracture mechanical characterisation of ferrite-austenite dissimilar metal welds (DMWs) for elevated temperature service in view of metallurgical mis-match*, Helsinki: International Conference on Life Management, 2013.
- [60] D. L. Lawrence J., *Metals Handbook, Vol 13, 9th ed., Corrosion*, ASM INTERNATIONAL, 1987.
- [61] R. N. Lumley, "20 - Joining of aluminium and its alloys," tekijä: *Fundamentals of aluminium metallurgy: production, processing and applications*, Oxford Philadelphia, Woodhead Pub, 2011, pp. 607-654.
- [62] R. Honeycombe ja H. Bhadeshia, *Steels: microstructure and properties*, Oxford: Elsevier, 2017.

- [63] Department of Materials Science & Metallurgy, University of Cambridge, "Dendritic Growth," University of Cambridge, [Online]. Saatavilla: https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/solidification_alloys/dendritic.php. [Haettu 29 12 2025].
- [64] H. Schönmaier, R. Krein, M. Schmitz-Niederer ja R. Schnitzer, "Influence of the Heat Input on the Dendritic Solidification Structure and the Mechanical Properties of 2.25Cr-1Mo-0.25V Submerged-Arc Weld Metal," *Journal of Materials Engineering and Performance*, osa/vuosik. 30, pp. 7138-7151, 2021. DOI:10.1007/s11665-021-05922-x
- [65] A. Afriansyah ja A. Arifin, "Dissimilar metal welding using Shielded metal arc welding: A Review," *Technology Reports of Kansai University*, osa/vuosik. 62, nro 4, pp. 1935-1948, 2020.
- [66] SubsTech Substances & Technologies, "Shielded Metal Arc Welding (SMAW)," SubsTech Substances & Technologies, 13 12 2023. [Online]. Saatavilla: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=shielded_metal_arc_welding_smaw. [Haettu 8 1 2026].
- [67] "Effect of SMAW process parameters on similar and dissimilar metal welds: An overview," *Heliyon*, osa/vuosik. 8, nro 12, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12161>
- [68] American Welding Society, *Welding Handbook*, Miami: American Welding Society, 2004.
- [69] SubsTech Substances & Technologies, "Tungsten Inert Gas Arc Welding (TIG, GTAW)," SubsTech Substances & Technologies, 13 12 2023. [Online]. Saatavilla: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=tungsten_inert_gas_arc_welding_tig_gtaw. [Haettu 8 1 2026].
- [70] P. Aaltonen, "Thermal embrittlement of safe-end welds in OL1 and OL2 units," Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 2010.
- [71] E. Keim ja D. Lidbury, "Review Of Assessment Methods Used In Nuclear Plant Life Management," European Commission EC, 2012.
- [72] International Atomic Energy Agency, "Improvement of in-service inspection in nuclear power plants," International Atomic Energy Agency, Vienna, 2004.
- [73] "PVC.XI.1 - BPVC Section XI-Rules for Inservice Inspection of Nuclear Reactor Facility Components, Division 1, Rules for Inspection and Testing of Components of Light-Water-Cooled Plants," The American Society of Mechanical Engineers ASME, [Online]. Saatavilla: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/bpvc-xi-bpvc->

- section-xi-rules-inservice-inspection-nuclear-power-plant-components/2025/print-book.
[Haettu 30 12 2025].
- [74] J. García-Martín, J. Gómez-Gil ja E. Vázquez-Sánchez, ”Non-destructive techniques based on eddy current testing,” *Sensors*, osa/vuosik. 11, nro 3, pp. 1424-8220, 2011.
<https://doi.org/10.3390/s110302525>
- [75] ”Ultrasonic testing,” Iowa State University Center for Nondestructive Evaluation, [Online]. Saatavilla: <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/SelectedApps/weldments.xhtml>. [Haettu 08 12 2025].
- [76] R. Ghoni, M. Dollah, A. Sulaiman ja F. M. Ibrahim, ”Defect Characterization Based on Eddy Current Technique: Technical Review,” osa/vuosik. 6, 2014.
DOI:10.1155/2014/182496
- [77] Wikipedia, ”Ultrasonic testing,” Wikipedia, [Online]. Saatavilla: https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_testing#. [Haettu 9 1 2026].
- [78] ”Overview of Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT),” Inspectioneering, [Online]. Saatavilla: <https://inspectioneering.com/tag/paut>. [Haettu 22 12 2025].
- [79] ”Eddy Current Testing,” Iowa State University Center for Nondestructive Evaluation, [Online]. Saatavilla: <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/EddyCurrent/eddycurrenttesting.xhtml>. [Haettu 9 12 2025].
- [80] AMS Advanced Maintenance Solutions, ”Eddy Current Testing (ET),” AMS Advanced Maintenance Solutions, [Online]. Saatavilla: <https://www.amssolutions.co.th/eddy-current-testing>. [Haettu 8 1 2026].
- [81] T. Moran, P. Ramuhalli, A. Pardini, M. Anderson ja S. Doctor, ”Replacement of Radiography with Ultrasonics for the Nondestructive Inspection of Welds – Evaluation of Technical Gaps – An Interim Report,” Pacific Northwest National Laboratory, 2010.
- [82] International Atomic Energy Agency IAEA, ”Improvement of Effectiveness of In-Service Inspection in Nuclear Power Plants IAEA-TECDOC-1853,” International Atomic Energy Agency IAEA, Vienna, 2018.
- [83] R. M. Meyer, P. Ramuhalli, M. B. Toloczko, L. J. Bond ja R. O. Montgomery, ”Assessment of NDE technologies for detection and characterization of stress corrosion cracking in LWRs In 3rd International Conference on NPP Life Management (PLIM) for Long Term Operations (LTO),” tekijä: *Paper No. IAEA-CN--194-066A*, Salt Lake City, Utha, 2012.
- [84] I. Virkkunen, M. Kemppainen, R. Paussu, J. Pirinen ja P. Luostarinen, ”Proposed improvements for use of different qualification defect types - three generations of defects.

- 8th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components,” NDT.net, Berlin, 2012.
- [85] O. Cronvall , ”Investigation of the OL2 45° Feed water Nozzle/safe-end weld and Indication, Rev. 2, VTT-CR-02888-14,” Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 2014.
- [86] E. Lehtonen, ”11041 ESISELVITYYS SAFE-END KORJAUKSIIN VARAUTUMINEN TVODOC-00056451,” Teollisuuden Voima Oyj, 2022.
- [87] I. Aho-Mantila ja H. Hänninen, ”Water chemistry and behaviour of materials in PWRs and BWRs,” Teknologian tutkimuskeskus VTT, Espoo, 1986.
- [88] C. A. Loto, ”Stress corrosion cracking: characteristics, mechanisms and experimental study,” *Int J Adv Manuf Technol*, osa/vuosik. 93, pp. 3567-3583, 2017.
<https://doi.org/10.1007/s00170-017-0709-z>
- [89] P. M. Scott ja P. Combrade, ”General corrosion and stress corrosion cracking of Alloy 600 in light water reactor primary coolants,” *Journal of Nuclear Materials*, osa/vuosik. 524, pp. 340-375, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.04.023>
- [90] International Atomic Energy Agency IAEA, ”Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: BWR pressure vessels,” International Atomic Energy Agency IAEA, Vienna, 2005.
- [91] Säteilyturvakeskus STUK, Säteilyturvakeskus STUK, [Online]. Saatavilla: <https://stuk.fi/fukushiman-ydinvoimalaitoksen-onnettomuus>. [Haettu 10 2 2026].
- [92] N. Nadhira, A. R. Mohammad Kairul Azhar, M. Sarizam ja A. Iqbal, ”Review on welding residual stress,” *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, osa/vuosik. 11, pp. 6166-6175, 2016.
- [93] ”OL1/OL2 - RPV NOZZLE WELD REPAIR SIMULATIONS - 312 NOZZLES VTT-R-06003-17,” Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Espoo, 2017.
- [94] ”SFS-EN 13480-3:2017 Metallic industrial piping. Part 3: Design and calculation,” Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, Helsinki, 2017.
- [95] Uddcomb Sweden Ab, ”TVO I Stuts för Mava, reference drwg No 334820,” 1976.
- [96] Nuclear Regulatory Commission NRC, ”Chapter 1.9. Chemistry,” tekijä: *General Electric Systems Technology Manual*, Nuclear Regulatory Commission NRC, 2011.
- [97] BWR Water Chemistry Guidelines Committee, ”BWR Water Chemistry Guidelines - 2000 Revision,” BWR Vessel and Internals Project (BWR VIP), EPRI Inc., Palo Alto, CA, 2000.

- [98] P. Andresen, "Understanding and predicting stress corrosion cracking (SCC) in hot water," tekijä: *Stress Corrosion Cracking of Nickel Based Alloys in Water-cooled Nuclear Reactors*, Elsevier, 2016, pp. 169-238. DOI:10.1016/B978-0-08-100049-6.00005-7
- [99] M. Ahonen, U. Ehrnsten, T. Saukkonen, O. Todoshchenko ja H. Hänninen, "Low Temperature Crack Propagation (LTCP) Susceptibility of Nickel-Based Alloy 182, 82, 152 and 52 Weld Metals," tekijä: *SAFIR2014 - The Finnish Research Programme on Nuclear Power Plant Safety 2011-2012, Final Report*, Espoo, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 2015, pp. 438-448.
- [100] I. U. Toor, "Repassivation Kinetics and its Role in SCC Prediction- A Review," *International Journal of Electrochemical Science*, osa/vuosik. 9, pp. 2737-2755, 2014. DOI:10.1016/S1452-3981(23)07964-6
- [101] GE Vernova Hitachi Nuclear Energy, "Hydrogen water chemistry (HWC)," GE Vernova Hitachi Nuclear Energy, 2025.
- [102] H.-P. Seifert ja S. Ritter, "The Role of Water Chemistry for Environmentally Assisted Cracking in Low-Alloy Reactor Pressure Vessel and Piping Steels under Boiling Water Reactor Conditions," *CHIMIA International Journal for Chemistry*, osa/vuosik. 59, nro 12, pp. 944-949, 2005. <https://doi.org/10.2533/000942905777675309>
- [103] R.-F. Liu ja M.-C. Young, "Influence on structure and fracture mechanics evaluations of a BWR feedwater nozzle following weld overlay repair," *Journal of Mechanics*, osa/vuosik. 39, pp. 113-134, 2023. <https://doi.org/10.1093/jom/ufad008>
- [104] H. Keinänen ja O. Cronvall, "OL2 - RPV 45 DEGREE FEEDWATER NOZZLE OVERLAY WELDING ANALYSIS VTT-R-06152-14," Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Espoo, 2015.
- [105] World Nuclear Association, "Fukushima Daiichi Accident," World Nuclear Association, 29 4 2024. [Online]. Saatavilla: <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/fukushima-daiichi-accident>. [Haettu 12 12 2025].

Liitteet

Liite 1. Kootut jännityskorroosioasiakirjat

Luottamuksellinen