

NÄKÖKOHTIA RISKITIETOISTEN MENETELMIEN SOVELTAMISESTA YDINVOIMALOIDEN MÄÄRÄAIKAISTARKASTUKSIIN

Matti Sarkimo
(VTT Tuotteet ja Tuotanto)

Tutkimuksen yhteyshenkilö Säteilyturvakeskuksessa **Olavi Valkeajärvi**

STUKin raporttisarjoissa esitetyt johtopäätökset ovat tekijöiden johtopäätöksiä, eivätkä ne välttämättä edusta Säteilyturvakeskuksen virallista kantaa.

ISBN 951-712-645-X (nid.)

ISBN 951-712-646-8 (pdf)

ISSN 0785-9325

Dark Oy, Vantaa 2003

SARKIMO Matti (VTT Tuotteet ja Tuotanto). Näkökohtia riskitietoisten menetelmien soveltamisesta ydinvoimaloiden määräaikaistarkastuksiin. STUK-YTO-TR 194. Helsinki 2003. 18 s.

Avainsanat: määräaikaistarkastus, riskitietoinen tarkastus, ultraäänitarkastus, RI-ISI

Tiivistelmä

Raportissa on tarkasteltu riskitietoisen lähestymistavan soveltamista ydinvoimaloiden rääikaistarkastuksiin eurooppalaisesta näkökulmasta katsottuna. Laajimmin on käsitelty ENIQ:n (European Network for Inspection Qualification) perustaman työryhmän toimintaa. Sen lisäksi on luotu lyhyet katsaukset Euroopan viranomaisten muodostaman työryhmän (NRWG), eräiden projektien ja pilot-hankkeiden tavoitteisiin ja saavutettuihin tuloksiin riskitietoisten tarkastusten kehittämisessä.

Omana osana on raportissa käsitelty pätevöinnin ja riskitietoisten tarkastusten välistä suhdetta. Tähän yhteyteen on liitetty tilastollista tulosaineistoa, joka on kertynyt määräaikaistarkastuksiin liittyvissä pätevöintikokeissa. Kyseiset pätevöinnit ovat henkilöpätevöintejä, jotka järjestetään sokkokokeina ydinvoimaloiden austeniittisia hitsejä tarkastaville ultraäänitarkastajille.

SARKIMO Matti (VTT Industrial Systems). Review of some risk informed approaches applied to in-service inspections of nuclear power plants. STUK-YTO-TR 194. Helsinki 2003. 18 pp.

Keywords: in-service inspection, risk informed inspection, ultrasonic inspection, RI-ISI

Abstract

This report considers the initiatives of risk informed methods to be applied to the in-service inspections of nuclear power plants from the European point of view. Most of emphasis is given to task group of ENIQ. Also the objectives and results of the task force of NRWG, of some projects and pilot studies in the field of risk informed inspection are briefly presented.

One section of the report discusses the link between inspection qualification and risk informed inspection. Also some statistical results from the qualification tests of Finnish nuclear industry are included. These qualifications have been ultrasonic blind tests for inspection personnel performing inspections of austenitic welds in the Finnish nuclear power plants.

Alkusanat

Tässä raportissa esitetty tutkimustyö on toteutettu osana FINNUS-tutkimusohjelmaan kuuluvaa projektia ”Tarkastukset ja kunnonvalvonta” (INSMO). Tutkimuksen rahoittajina ovat olleet Säteilyturvakeskus ja Kauppa- ja teollisuusministeriö.

Osoitan kiitokseni Kaisa Simolalle VTT Tuotteet ja tuotannosta, joka teki havaitsemistodennäköisyyksiä kuvaavien käyrien sovitukset pätevöintikokeista kertyneiden data-aineistojen pohjalta. Kiitokset myös Pauli Särkiniemelle VTT Tuotteet ja tuotannosta ja Juha Sillanpäälle Inspecta Oy:stä pätevöintikokeiden tulosaineistojen keräämisestä ja luovuttamisesta käytettäväksi.

Työn valvojana Säteilyturvakeskuksesta on toiminut ylitarkastaja Olavi Valkeajärvi.

Espoo, 19.12.2002

Tekijä

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKUSANAT	5
1 JOHDANTO	7
2 EUROOPPALAISIA RI-ISI -HANKKEITA	8
2.1 ENIQ TG R	8
2.1.1 ENIQ Discussion document	8
2.1.2 Nykyinen toiminta	9
2.1.3 Framework Document	10
2.2 Nuclear Regulator Working Group (NRWG)	10
2.3 RIBA -projekti	10
2.4 NURBIM -projekti	11
2.5 Säteilyturvakeskuksen pilot-tutkimus	11
2.6 Olkiluodon pilot-hanke	11
2.7 Oskarshamn 1:n pilot-hanke	12
3 PÄTEVÖINTI SUHTEESSA RISKIPERUSTEISEEN TARKASTUKSEEN	13
3.1 Tarkastusten päteväinti	13
3.2 Yhteyksiä pätevöinnin ja RI-ISI:n välillä	13
3.3 YVL-henkilöpätevöinneissä saatuja tuloksia	15
4 YHTEENVETO	17
LÄHDEVIITTEET	18

1 Johdanto

Erilaisin rikkomattomin menetelmin suoritettavat määräaikaistarkastukset muodostavat tärkeän osan niistä toimenpiteistä, joiden avulla ydinvoimalaitosten putkistojen ja laitteiden eheys varmistetaan. Määräaikaistarkastukset tehdään laadittujen suunnitelmien mukaisesti. Nämä suunnitelmat on perinteisesti laadittu Suomessa ASME XI:n sisältämään ohjeistukseen perustuen. Voidaan sanoa, että myös tässä lähestymistavassa riskitietoisuus on huomioitu. Kohteiden turvallisuusluokituksen avulla on otettu huomioon vaurioiden aiheuttamia seurausvaikutuksia. Vaurioille alttiit alueet on puolestaan pyritty löytämään lähinnä laitoksen suunnitteluperusteisiin nojautuen, jolloin esimerkiksi suurien jännityskeskittymien alueelle on kohdistettu tarkastuksia. Lisäksi on tarkastusohjelmiin käytännössä tehty lisäyksiä esimerkiksi käyttökokemusten, tarkastustulosten tai todettujen riskitekijöiden perusteella. Riskitietoisten määräaikaistarkastusten (Risk-informed in-service inspection, RI-ISI) avulla on kuitenkin lähdetty systemaattisesti etsimään tehokkaampaa tapaa kohdentaa ja toteuttaa tarkastuksia. RI-ISI-ajattelussa pyritään tunnistamaan laitoksen käytön ja käyttöolosuhteiden kannalta mahdolliset vaurioitumismekanismit. Samalla kartoitetaan ja arvioidaan erilaisin menetelmin mahdollisten vaurioiden aiheuttamat seuraukset. Huomioimalla sekä vaurioitumistodennäköisyydet että seurausten vaikutukset etsitään kokonaisriskin kannalta tärkeät tarkastuskohteet.

RI-ISI-lähestymistavan soveltaminen on useissa tapauksissa aiheuttanut merkittäviä muutoksia määräaikaistarkastusohjelmiin. Tarkastuskohteiden lukumäärä on saattanut pienentyä huomattavastikin, kun matalan riskin kohteita on jätetty pois. Toisaalta on myös eräissä tapauksissa havaittu riskin kannalta merkittäviä koh-

teita, jotka ovat jääneet perinteisten tarkastusohjelmien ulkopuolelle.

Yhdysvalloissa on jo huomattava osa ydinvoimalaitoksista siirtynyt soveltamaan RI-ISI-lähestymistapaa ja on arvioitu, että vuoden 2003 loppuun mennessä lähes kaikki laitokset käyttävät sitä jossain muodossa (Ammirato 2001). Myös ASME XI sisältää tällä hetkellä kolme niin kutsuttua Code Case:a, jotka sisältävät ohjeistuksen riskitietoisten menetelmien soveltamisesta määräaikaistarkastuksissa. Nämä Code Case:t ovat:

- N-577: Risk Informed Requirements for Class 1, 2 and 3 Piping, Method A (WOG-menetelmä)
- N-578: Risk Informed Requirements for Class 1, 2 and 3 Piping, Method B (EPRI-menetelmä)
- N-560: Alternative Examination Requirements for Class 1, Category B-J Piping Welds (EPRI-menetelmä)

Eurooppalaisissa ydinvoimaloissa RI-ISI-lähestymistapaa on sovellettu toistaiseksi lähinnä pilot-hankkeina ja samalla on EU-maiden yhteisprojekteissa lähdetty luomaan pohjaa yhteisen eurooppalaisen näkemyksen ja käytännön muodostamiseksi. FINNUS/INSMO-projektin osalta on pyritty seuraamaan erityisesti ENIQ:n (European Network for Inspection Qualification) toimintaa RI-ISI-alueella, joten sen toimintaa on kuvattu tässä raportissa laajemmin. Samalla on kuitenkin lyhyesti referoitu eräitä muita viimeaikaisia eurooppalaisia ja kotimaisia RI-ISI-hankkeita, joita on toteutettu ydinvoimateollisuuden piirissä. Tarkastusten pätevöinnin ja RI-ISI:n välinen suhde ja niiden kytkeminen toisiinsa on mielenkiintoinen ja tärkeä asia, josta on esitetty eräitä ajatuksia raportin viimeisessä luvussa. Samaan yhteyteen on koottu tilastollista aineistoa päteväintikoikeissa saaduista tuloksista vikojen havaitsemisen kannalta.

2 Eurooppalaisia RI-ISI -hankkeita

2.1 ENIQ TG R

Eurooppalaisella tasolla on ydinvoimalaitosten määräaikaistarkastusten kehittämistä riskitietoista lähestymistapaa kohti pohdittu ENIQ:n (European Network for Inspection Qualification) alaisuuteen kuuluvassa työryhmässä. Ryhmän toiminta on käynnistetty vuonna 1996 nimellä Task Group 4 (TG 4). Sen toiminnan tavoitteiksi määriteltiin yleisellä tasolla toimia yhteistyöelimenä kerättyä, selvitettyä ja levitettyä informaatiota, jonka pohjalta määräaikaistarkastusten periaatteita voitaisiin viedä kohti riskitietoista lähestymistapaa.

Toiminta hiipui kuitenkin 1990-luvun lopulla. Vuonna 2000 ryhmä aktivoitiin uudelleen ja säännölliset kokoukset alkoivat jälleen. Samana vuonna ENIQ julkaisi raportin ”Discussion document on risk informed in-service inspection of nuclear power plants in Europe” (ENIQ 2000), jonka syntymiseen TG 4 vaikutti aktiivisesti. Raportin alkupuheessa todetaan kuitenkin, että sen aineisto pohjautuu EURIS Concerted Action (European Network for Risk Informed In-service Inspection) työn tuloksena laaditun raportin aineistoon.

2.1.1 ENIQ Discussion document

”ENIQ Discussion document” katsotaan sen tekijöiden mukaan jatkoksi EURIS-hankkeessa tehdylle työlle. EURIS päättyi helmikuussa 2000 ja sen keskeinen päämäärä oli tunnistaa ja analysoida kaikki tärkeimmät elementit, jotka tulee huomioida riskiperusteissa päätöksenteossa tarkastuksia suunniteltaessa. ”ENIQ Discussion document”:n tavoitteena todetaan olleen kehittää riskiperusteista metodologiaa laitosten käyttäjien tarpeisiin ja tässä pyrkimyksessä julkaisu oli ensimmäinen vaihe, johon on koottu ENIQ TG 4:n edustajien yhteiset näkemykset.

Itse dokumentti on melko laaja ja sisältää

riskiperusteisen tarkastuksen yleiset periaatteet kattavasti. Siinä käsitellään metodologian lähtökohtia sekä vaurioitumistodennäköisyyden arvioinnin että varioiden seurausten analysoinnin kannalta. Kokonaisriskin määrittämiseksi esitellään erilaisia tapoja, jotka huomioivat vaurioitumiseen ja seurauksiin liittyviä tekijöitä. Eri tietolähteistä ja -kannoista saatavissa olevan tiedon tärkeyttä ja sen soveltamista on käsitelty lyhyesti ja samalla on listattu kattavasti informaatio, joka tulisi selvittää laitospohjaisesti. Yksi luku raportista on käytetty pohdiskeluun kokonaan tuntemattoman tekijän (”tekijä X”) ottamiseen huomioon RI-ISI -tarkastelussa. Tällä tarkoitetaan ennalta täysin tuntemattoman ja aavistamattoman vaurioitumismekanismien esiintymistä. Tämän tekijän suhteen päädytään toteamukseen, että havaitsemistodennäköisyys tällaisen ennalta aavistamattoman tekijän suhteen riippuu vain tarkastuksen laajuudesta. Tuntemattoman tekijän käsittely on nimenomaisesti haluttu erottaa oletetun vauriomekanismien käsittelystä. Oletettu vauriomekanismi on tunnettu ja sen voidaan olettaa esiintyvän tietyissä olosuhteissa, jolloin tarkastuksia voidaan käyttää sen löytämiseen tai esiintymismahdollisuuden poissulkemiseen. Sen sijaan tuntemattoman, tekijän X, suhteen ei ole minikäänlaisia ennako-oletuksia asetettavissa.

Raportin loppuosassa käydään läpi keinoja tehokkaan riskipohjaisen tarkastusohjelman luomiseksi. Samalla on kiinnitetty huomiota myös siihen, että tarkastuskohteiden määrittelyn lisäksi tulisi tuottaa tietoa sopivien tarkastusmenetelmien ja -tekniikoiden valitsemiseksi. Jos tarkastuksiin liittyy pätevänti, tulisi myös lähtötiedot päteväntiä silmällä pitäen määrittellä. Kohteiden valintaan liittyen on myös tuotu esiin tarve määrittää tarkastusten tehokkuus, jotta voidaan arvioida niiden vaurioiden esiintymistodennäköisyyt-

tä alentava vaikutus. Tässä arvioinnissa vikojen havaitsemistodennäköisyys, johon tarkastusmenetelmä ylittää, on keskeinen tekijä. Tarkastusmenetelmän tehokkuutta voidaan edelleen käyttää hyväksi, kun arvioidaan, kuinka paljon tarkastuskohteita on järkevää sisällyttää tarkastusohjelmaan. Kun jo tarkastettujen kohteiden vaurioitumistodennäköisyys jää korkeammalle tasolle kuin tarkastamattomien kohteiden, on syytä harkita, kannattaako enää uusia kohteita sisällyttää tarkastusohjelmaan.

2.1.2 Nykyinen toiminta

Vuoden 2001 lopussa ENIQ:n johtoryhmä päätti muutoksista sen alaisuudessa toimivissa työryhmissä ja eräiden ryhmien toiminta lopetettiin. Tällöin TG 4:n toiminnan jatkaminen katsottiin tärkeäksi ja sen toimintaa päätettiin vahvistaa sekä muutettiin samalla nimi TG R:ksi (Task Group Risk).

Maaliskuussa 2002 TG R piti käynnistyskokouksen, jossa sen tuli johtoryhmän asettaman veloitteen mukaisesti hahmotella tulevan toimintansa suuntaviivat. Kokouksen merkittävin johtopäätös oli, että ryhmän tulisi luoda yhteiset eurooppalaiset puitteet RI-ISI -alueella ottaen huomioon sen kaikki osa-alueet. Työn tulisi huomioida riskitietoisien tarkastuksen eri hankkeet, joita on käynnissä monissa EU:n maissa kansallisella tasolla. Erilaisten lähestymistapojen osalta tulisi pyrkiä harmonisointiin ja yhteiseen näkemykseen EU:n tasolla. Samalla tulisi kuitenkin jättää riittävästi joustavuutta paikallisten vaatimusten huomioimiseksi. Asetettu tavoite tulisi toteuttaa luomalla yleinen ohjeistus (Framework document).

Samassa käynnistyskokouksessa pidetyn ideoinnin tuloksena syntyi lista asioista ja toimenpiteistä, jotka työryhmä katsoi tärkeiksi. Se kuvastaa omalta osaltaan työryhmän mielenkiinnon suuntautumista ja niitä osa-alueita, joihin se tulee työskentelyssään keskittymään. Lista on esitetty alla lainattuna suoraan kokouksen pöytäkirjasta:

List of specific actions/activities to be taken by TG R

As a result of the brainstorming a list of actions/activities considered of high priority for the group have been identified:

- 1) Interaction between Structural Reliability Models and databases
To investigate how the specific failure probabilities determined from SRM's compare with global failure probabilities.
- 2) Situation where no Quantitative Assessment is Possible
How to handle degradation mechanisms where no suitable SRM or databases exist i.e. how do we balance qualitative and quantitative assessment of passive component failure probabilities?
- 3) Interaction between Leak Size and PSA
Since SRM calculations can include leak size evaluation, how does this interface with PSA/PRA? How acceptable are such leak size evaluations?
- 4) Design Based Safety Classification
How does a RI-ISI assessment interact with codes that identify safety significant components/sites using deterministic based analysis?
- 5) Consequence Measure
Look at fission product release as a consequence measure as well as Probability of Core Damage. Also look at how the financial consequence can be used within a safety assessment.
- 6) Criteria for Inspection
How to establish the line on a risk plot/ranking that separates risk significant from non risk significant sites? How does uncertainty enter the evaluation?
- 7) The Unknown
Look at how the unknown can be accommodated within a risk informed philosophy. This should cover the 'Postulated' situation and the truly unknown or 'Virtual' risk?
- 8) Interaction between RI-ISI & Qualification
Look at how these two independently developed philosophies interact.
- 9) How to Evaluate a Probability of Detection Curve
Try to see how a PoD could be evaluated for a

given inspection and how inspection qualification might be used to help in this exercise or to give confidence in a given PoD.

10) Feed Back of Inspection Outcome.

Look at how the results of a given inspection effect both the inspected site itself and its relative risk to other sites that have not been inspected?

2.1.3 Framework Document

Vuoden 2002 toisessa kokouksessaan TG R on lähentynyt suunnittelemaan yleisohjeen (Framework Document) suuntaviivoja ja käytännön toteutusta. Dokumentin tulisi integroida niitä riskitietoisien tarkastuksen hankkeita, jotka ovat käynnissä kansallisella tasolla monissa EU:n maissa ja samalla harmonisoida näitä pyrkimyksiä edistämällä yhteisen näkemyksen syntyä EU:ssa. Lähestymistavan tulee kuitenkin olla riittävän joustava, jotta varmistetaan sen sovellettavuus erilaisten maakohtaisten vaatimusten osalta.

Edelleen tämän yleisohjeen tulisi olla ylemmän tason dokumentti, joka luo eurooppalaisen lähestymistavan riskiperusteiseen päätöksentekoon tarkastusten suunnittelussa. Sen tulisi olla suositusluontoinen ja sisältää keinot kohti riskiperusteisen tarkastuksen toteutusta erityisesti niitä käyttäjiä varten, joilla ei ole käytettävissä omaa metodologiaa.

2.2 Nuclear Regulator Working Group (NRWG)

Nuclear Regulator Working Group (NRWG) on EU:n neuvoa-antava asiantuntija ryhmä, joka koostuu EU:n jäsenmaiden ydinvoima-alan viranomaisten sekä teknisten tukielimien asiantuntijoista. Myös Sveitsi ja useat Itä-Euroopan maat ovat edustettuina tarkkailijoina.

Vuonna 1996 NRWG muodosti työryhmän riskiperusteisen määräaikaistarkastuksen ja testauksen alueelle. Työryhmä on julkaissut vuonna 1999 raportin, jossa selvitetty etupäässä käynnissä olleita hankkeita ja vallinnutta tilannetta riskitietoisien tarkastuksen alueella (NRWG 1999).

Tällä hetkellä NRWG on koonnut uuden työryhmän kaudelle kesäkuu 2002 - 2003:n puoliväli. Sen tarkoituksena on analysoida RI-ISI:n liittyviä

näkökohtia viranomaisten näkökulmasta. Sen työn tuloksena odotetaan muodostuvan raportti, joka etenee pidemmälle kuin aikaisempi state-of-the-art -raportti ja tulee sisältämään suosituksia ja viranomaisten yhteisiä kannanottoja.

Yhteyttä NRWG ja ENIQ TG R:n välillä on pidetty molemminpuolisesti tärkeänä. Ryhmät ovat pyrkineet pitämään toisiaan ajan tasalla toimintansa ja kehityshankkeidensa suhteen esimerkiksi kutsumalla edustajia toistensa kokouksiin.

2.3 RIBA -projekti

Projekti nimeltään ”Risk-Informed Approach for In-Service Inspection of Nuclear Power Plant Components” (RIBA) on toteutettu EU:n komission DG TREN (Energy & Transport) alaisuudessa kaksivuotisena projektina vuosina 1999-2001.

Projektin päätavoitteet olivat:

1. Identifioida, analysoida ja arvioida valmiit ja kehitteillä olevat riskiperusteiset metodologiat, jotka ovat sovellettavissa kevytvesireaktoreiden turvallisuuteen vaikuttavien komponenttien määräaikaistarkastuksiin.
2. Esitellä yksityiskohtainen esimerkki RI-ISI -metodologian soveltamisesta kevytvesireaktorilaitokseen Euroopassa.
3. Pyrkä kohti standardeja tuottamalla yksityiskohtaisia suosituksia, joiden avulla voidaan saada aikaan yleisiä ohjeita RI-ISI:n soveltamisesta Euroopassa.

Projektin tulokset on julkaistu neliosaisena raporttina (RIBA 2001). Lyhyessä yhteenvetoraportissa on esitetty projektin kuvaus päätasolla ja tärkeimmät päätelmät. Projektin kolmea päätavoitetta koskevat tulokset on koottu kolmeen osaraporttiin, jotka ovat kooltaan melko laajoja. Projektista laaditut osaraportit ovat:

1. Project Summary (suppea yhteenveto)
2. Task 1 Report: Review of Existing Risk-Informed Methodologies
3. Task 2 Report: A Comparative Study of Risk-Informed In-Service Inspection Applications
4. Task 3 Report: Conclusions and Recommendations for Risk-Informed In-Service Inspection Methodology Applied to Nuclear Power Plants in Europe

2.4 NURBIM -projekti

Projekti nimeltään ”Nuclear Risk-Based Inspection Methodology” (NURBIM) on EU:n viidenteen puiteohjelmaan kuuluva projekti. Se on käynnistynyt syksyllä 2001 ja on kestoaltaan 32 kuukautta. Hankkeen koordinaattorina toimii GRS mbH (D) ja siihen osallistuvat EDF (F), OKG AB (S), E.ON Kernkraft GmbH (D), Det Norske Veritas (S), NRI-REZ (CZ), O.J.V. Consultancy (UK), The Welding Institute LTD (UK), Mitsui Babcock Technology Centre (UK), JRC (NL), Tecnomat/Iberdrola (ES) ja VTT Industrial Systems (SF).

Projektin tavoitteena on määrittellä hyviä ja suositeltavia käytäntöjä, joita voitaisiin hyödyntää riskitietoisten tarkastusohjelmien soveltamisessa Euroopassa. Projektin päävaiheet ovat seuraavat:

- aktiivisten (olemassa olevien ja etenevien) ja potentiaalisten vauriomekanismien määrittäminen eurooppalaisten ydinvoimalaitosten osalta.
- yleisten kriteerien (mukaan lukien validointikriteerit) määrittäminen todennäköisyyspohjaisille rakenneanalyysimalleille.
- kvalitatiivisten ja puoli-kvantitatiivisten menetelmien kehittäminen riskin arviointiin.
- nykyisten todennäköisyyspohjaisten rakenneanalyysimallien arviointi vertailemalla ja selvittämällä ohjelmistojen suorituskykyä.
- todennäköisyyspohjaisten rakenneanalyysimallien puutteiden tunnistaminen ja niihin liittyvät parannusehdotukset.
- todennäköisyyspohjaisen rakenneanalyysin ja seurausanalyysin vuorovaikutuksen selvittäminen kokonaisriskin määrittelyssä.
- riskiperusteisen lähestymistavan tutkiminen turvallisuuden ja kustannusvaikutusten osalta.
- riskiperusteisen tarkastuskäytännön ja tarkastusten suorituskyvyn sekä pätevöinnin välisten suhteiden tutkiminen.
- riskiperusteisen lähestymistavan esimerkinomainen soveltaminen sopivaan laitospöytäkirjaan.
- tulosten kokoaminen käsikirjaksi projektin kuudessa yleiseksi metodologiaksi ja suosituksiksi.

2.5 Säteilyturvakeskuksen pilot-tutkimus

Säteilyturvakeskus on tehnyt pilot-tutkimuksen, jossa oli tavoitteena määrittää riskiavusteinen putkistoa koskeva määräaikaistarkastusohjelma PSA:n tulosten perusteella tukeutumatta järjestelmien turvallisuusluokitukseen. Menettelyä sovellettiin kaikkiaan neljään järjestelmään, joista kaksi oli valittu Olkiluodon ja kaksi Loviisan ydinvoimalaitoksilta. Pilot-tutkimus (Mononen et al. 2001) on raportoitu osana laajempaa raporttia, jossa on käsitelty useita aiheita, jotka liittyvät riskiavusteisen valvonnan kehittämiseen Säteilyturvakeskuksessa. Raportti sisältää muun muassa kirjallisuuskatsauksen riskiavusteisesta tarkastuksesta ja testauksesta.

Pilot-tutkimuksessa kehitettiin menetelmä rakenne putkistojen riskiavusteisen tarkastusohjelman laadintaan ja arvioitiin sen toimivuutta esimerkkikohteiden avulla. Tutkimuksessa kehitettiin EPRI:n menetelmän kanssa samansuuntainen menetelmä rakenne. Sen keskeiset vaiheet olivat: putkiston jako segmentteihin, segmenttien vaurioitumisluokan määrittely, segmenttien seurausluokan määrittely, alustavan riskimatriisin luominen, determinististen ja todennäköisyyspohjaisten analyysien yhdistäminen lopullisen riskimatriisin muodostamiseksi. Viimeiseen vaiheeseen liittyi paneeliprosessi, johon oli koottu eri alojen asiantuntijat lopullista päätöksentekoa varten. Paneeliprosessia on kuvattu tarkemmin erillisessä raportissa Pulkkinen & Simola (2000). Tutkimuksessa ei kuitenkaan muodostettu mukana olleille järjestelmille uusia määräaikaistarkastusohjelmia, vaan se päättyi tasolle, jolla riskiluokittelu ja kohteiden priorisointi oli tehty. Menetelmän soveltamisesta saatuja kokemuksia pidetään myönteisinä ja sen katsotaan olevan käyttökelpoinen sekä sovellettavissa laajemminkin.

2.6 Olkiluodon pilot-hanke

Olkiluodon voimalaitoksella toteutettiin diplomityönä hanke, jonka keskeisenä tehtävänä oli kehittää riskitietoinen menetelmä ydinvoimalaitoksen putkistohitsien määräaikaistarkastuksille (Tupala 2002). Kehitettyä menetelmää sovellettiin Olkiluoto 1 voimalaitoksen sammutetun reaktorin jäädytysjärjestelmään ja tarkasteltiin,

millaisia muutoksia uusi tarkastuskohteiden valintamenettely aiheutti verrattuna perinteiseen tarkastusohjelmaan.

Sovellettu menetelmä noudattaa pääosin EPRI:n kehittämää metodiikkaa, mutta kirjoittaja toteaa, että myös tietoja WOG:n sovelluksesta on hyödynnetty. Työn tuloksena syntyneen uuden tarkastusohjelman todetaan vähentävän tarkastettavien hitsien lukumäärän noin neljännekseen verrattuna nykyiseen ASME XI:n mukaiseen käytäntöön. Vähennys johtuu kahdesta tekijästä. Tarkastusprosentti nykyisen järjestelmän mukaan on suurimmalle osalle järjestelmän hitseistä 25 % kun vastaava tarkastusprosentti EPRI:n menetelmässä on 10 %. Lisäksi vanha järjestelmä kohdistaa tarkastukset koko järjestelmään. Sen sijaan uusi tarkastusten valintatapa kohdistaa tarkastukset vain noin puoleen koko putkistosta eli siihen osaan, jossa vauriomekanismit katsotaan mahdollisiksi. Säilyttämällä tarkastusprosentti nykyisellä tasolla päädyttäisiin tarkastusmäärissä noin puoleen nykytasosta vain hyödyntämällä EPRI:n mukaista tarkastusten entistä tarkempaa kohdentamista. Toisaalta sovellettu riskitietoinen menetelmä nosti esiin kaksi nykyiseen tarkastusohjelmaan kuulumatonta hitsiä, joiden sisällyttämistä ohjelmaan ehdotetaan harkittavaksi.

2.7 Oskarshamn 1:n pilot-hanke

Ruotsissa toteutettiin Oskarshamn 1 laitoksen osalta pilot-projekti, jonka tavoitteena oli arvioida kiehutusvesilaitoksen sydänvaurion riskiä putki- vuotojen ja -katkosten seurauksena ja käyttää

tätä informaatiota kohteiden valitsemiseksi määrääkaistarkastusohjelmaan. Tarkoituksena oli myös tutkia todennäköisyyspohjaisin menetelmin määritettyjen tarkastusvälien merkitystä (Brickstad 2000).

Koska haluttiin päästä vertailemaan nykyisen käytännön ja uuden tarkastusohjelman välistä kokonaisriskin muutosta, tarkasteluun sisällytettiin kaikkiaan kuusi järjestelmää. Tällöin mukana olivat kaikki järjestelmät, joihin katsottiin liittyvän jokin tunnettu potentiaalinen vauriomekanismi. Riskiperusteisen kohteiden priorisoinnin ja valinnan lisäksi työssä on arvioitu tarkastusten vaikutusta vaurioiden esiintymistodennäköisyyksiin. Tässä tarkastelussa on huomioitu sekä tarkastusten jaksotus että niiden laatu.

Työn loppupäätelmissä todetaan muun muassa, että kvantitatiivinen riskin määrittely on tehokas tapa ohjata tarkastusten priorisointia primääriputkiston osalta. Tulokset osoittivat, että riskin realistista arviointia varten on otettava mukaan malli, joka kattaa vuotojen havaitsemisen ja niiden suuruuden arvioimisen. Suurimman riskin muodostavat kohteet, joiden vauriomekanismeina ovat samanaikaisesti sekä jännityskorroosio (IGSCC) että värähtelyn aiheuttama väsyminen. Jos päteviä tarkastusta ei ole tehty aiemmin, todetaan sellaisen tekemisen mahdollisimman pian olevan tehokas tapa alentaa riskiä. Edelleen todetaan nykyisen vallitsevan määrääkaistarkastusten valintamenettelyn ottavan tehokkaasti mukaan korkean riskin kohteet, mutta vallitsevan myös useita matalan riskin alueita.

3 Pätevöinti suhteessa riskiperusteiseen tarkastukseen

Viime vuosina tarkastusten pätevöinnin kehittäminen ja tuominen mukaan olennaiseksi osaksi määräaikaistarkastuksia on ollut tärkeä ja suuri kehityshanke monissa maissa. Toinen huomattava muutos määräaikaistarkastuksiin on odotettavissa RI-ISI -käytännön soveltamisen myötä. Näiden kahden kehityskulun välillä on nähtävissä yhteyksiä, joita on seuraavassa tarkasteltu.

3.1 Tarkastusten pätevöinti

Haluttaessa parantaa NDT -menetelmien luotettavuutta on pätevöinti katsottu tähän tarkoitukseen sopivaksi ja tehokkaaksi toimenpiteeksi. Pätevöinnin voidaan ajatella olevan suunnitelmallinen ja systemaattinen tapa, jolla osoitetaan, dokumentoidaan ja myös muodollisesti hyväksytään tarkastusjärjestelmän tai sen osan riittävä suorituskyky.

Yhdysvalloissa ydinvoimaloiden tarkastuksia koskeva pätevöintikäytäntö luotiin 1990-luvun alkupuolella ja se sai nimityksen ”Performance Demonstration Initiative” (PDI). Koekappaleiden tulee olla ”edustavia” (representative) eli materiaalien, mitoituksen ja valmistustekniikan tulee vastata todellisuutta. Lisäksi koekappaleiden sisältämien vikojen pitää olla pääasiassa todellisia ja keinotekoisia vikoja kuten koneistettuja uria sallitaan vain rajoitetusti. Koekappaleilla on katettu keskeiset tarkastuskohteet, jotka sisältyvät USA:n ydinvoimaloiden määräaikaistarkastusohjelmiin. Kaikki koekappaleita ja vikoja koskevat tiedot ovat salaisia. Kun tarkastusyhtiö haluaa päästä tekemään määräaikaistarkastuksia tiettytyypiselle kohteelle, sen pitää suorittaa koe käyttäen kohdealuetta vastaavia koekappaleita. Jos suoritus arvioidaan kokonaisuudessaan riittävän korkeatasoiseksi, yhtiö saa hyväksynnän, joka oikeuttaa sen tekemään tarkastuksia kyseisen luokituksen komponenteille. Yksityiskohtaisia tietoja kokeen tuloksista ei anneta.

Euroopassa pätevöintikäytäntö perustuu ENIQ:n puitteissa luotuun metodologiaan ja sitä täydentäviin suosituksiin. Eri maissa ENIQ:n lähtökohtien mukaisesti on luotu omia kansallisia käytäntöjä käytettävissä olleiden resurssien ja

nähtävissä olleiden tarpeiden mukaan. ENIQ:n mukaan toteutettuna pätevöinnin voidaan katsoa koostuvan kahdesta osasta, jotka ovat:

1. Käytännön koe, joka toteutetaan käyttäen yksinkertaistettuja tai tarkastuskohdetta edustavia koekappaleita. Koekappaleiden testiviatiat, jotka pätevöitävällä tarkastusmenetelmällä tulee löytää ja mahdollisesti mitoitaa, voivat olla suorittajien tiedossa (avoin koe) tai salaisia (sokkokoe). Avoimia kokeita käytetään tyyppillisesti tarkastusmenetelmien ja -ohjeiden pätevöinnissä ja sokkokokeita pääsääntöisesti henkilöpätevöinneissä.
2. Tekninen perustelu, jossa esitetään kirjallisessa muodossa erilaiset todisteet tarkastusmenetelmän suorituskyvystä. Todistelussa voidaan käyttää esimerkiksi aikaisemmin saatuja kokemuksia sovelluksen käytöstä, tutkimukseen ja kirjallisuuteen pohjautuvia tietoja, kokeellisia tuloksia, matemaattisen mallinnuksen tuloksia, jne.

3.2 Yhteyksiä pätevöinnin ja RI-ISI:n välillä

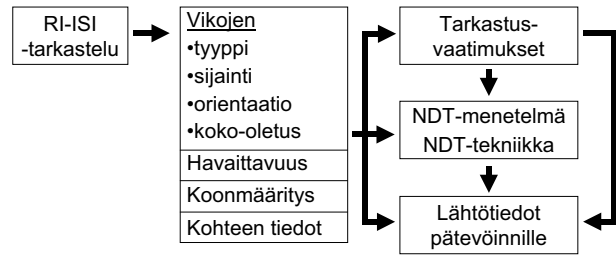
Kun tarkastuskohteiden valintaa toteutetaan riskitietoisin menetelmin, selvitetään ja kootaan kohdetta koskevaa tietoa laajasti. Esimerkiksi mahdolliset vauriomekanismit pyritään kartoittamaan huolellisesti. Kohteessa esiintyvän vaurio-tyypin ja sen sijainnin tunteminen on ensiarvoisen tärkeää tarkastuksen suunnittelun ja toisaalta myös sen pätevöinnin kannalta. Vaurioitumista käsittelevän informaation lisäksi kootaan RI-ISI -prosessissa runsaasti myös muuta aineistoa, joka

koskee esimerkiksi materiaaleja, hitsausta, geometrisia muotoja, kohteiden fyysistä sijaintia. Useat näistä tiedoista ovat merkityksellisiä tarkastuksen kannalta. Pätevöinnissä nämä tiedot muodostavat osan niin sanotuista lähtötiedoista, jolloin RI-ISI -menettely tarjoaa erittäin sopivan tilaisuuden niiden kokoamiseen (kuva 1).

Jos tarkastellaan, millaista näyttöä päteväinnissä saadaan tarkastusjärjestelmän suorituskyvystä, voidaan todeta, että POD (probability of detection) -käyriä ei yleensä kyetä laatimaan yksittäisen päteväinnin tulosten pohjalta. Päteväinneissä käytettävät koekappaleet sisältävät normaalisti liian vähän vikoja, jotta kunnollista tilastollista luotettavuutta kyettäisiin saavuttamaan. Yleisemmällä tasolla POD -käyriä voidaan ehkä muodostaa, kun kerätään suurempi datajoukko yhdistelemällä useiden tarkastuksen suorittajien tai useiden tarkastusten tietoja. Toisaalta yksittäisten vikojen osalta ja niihin liittyvien muuttujien vaikutuksesta voidaan saada selville ”pistemäisiä” arvioita, jotka antavat ainakin karkean kuvan havaitsemistodennäköisyydestä. Näin ollen malleihin, joilla arvioidaan todennäköisyyspohjaisesti vaurioitumisriskiä, on yksittäisten päteväintien kautta odotettavissa vain melko yleisiä ja/tai karkeita tietoja.

Toisaalta voidaan katsoa, että ENIQ:n mukainen avoin lähestymistapa ja koejärjestely antaa mahdollisuuden tarkastella tarkastusjärjestelmän toimivuutta sen eri osien kannalta. Tällöin on mahdollista korjata havaittuja tarkastusjärjestelmän heikkouksia ja puutteita. Jos näitä puutteita ei kyetä kokonaan poistamaan, voidaan niiden vaikutus tarkastuksen tehokkuuteen arvioida ja huomioida ne RI-ISI -päätöksenteossa esimerkiksi tarkastusvälien pituuksia määrittäessä. Tältä kannalta ENIQ:n mukainen avoin lähestymistapa päteväintiin vaikuttaa selvästi mielekkäämmältä kuin PDI, joka tuottaa vain hyväksyty/hylätty-tuloksen.

ENIQ:n päteväintikäytäntöön kuuluva tekninen perustelu antaa mahdollisuudet hyödyntää laajaa lähdeaineistoa tarkastuksen suorituskyvyn perusteluun. Tämän aineiston tulee olla relevanttia, mutta sen ei tarvitse olla yksinomaan kyseiseen päteväintiin liittyvää. Näin ollen voidaan koota ja käyttää hyväksi laajempia, yleisempiä tulosaineistoja tai käytännön tarkastuksista saatuja kokemuksia. Tämän tyyppiset laajemmat läh-

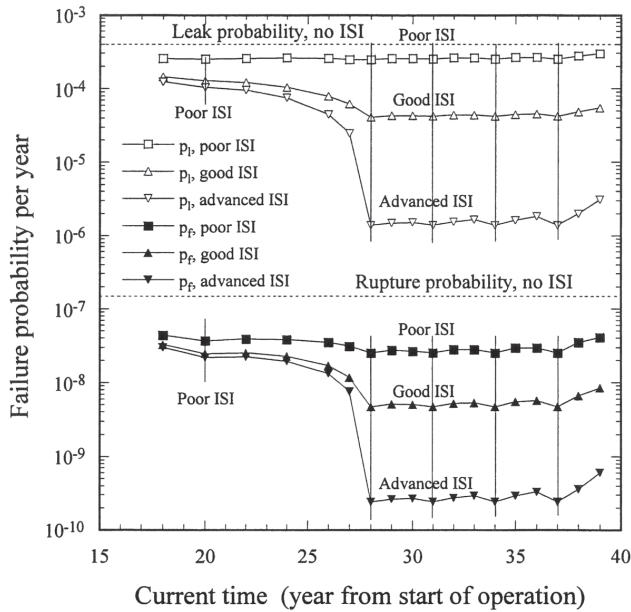


Kuva 1. Riskitietoisien tarkastusten määrittelyn aikana kertyvä tieto ja sen linkittyminen päteväinnin lähtötiedoiksi.

deaineistot saattavat osaltaan antaa riittävän tarkan kuvan suorituskyvystä RI-ISI-tarkastelua varten.

Kun tarkastusjärjestelmän suorituskyky tunnetaan, on todennäköisyyspohjaisissa rakenneanalyysimalleissa mahdollista arvioida tarkastusten toteuttamisen ja myös niiden tehokkuuden vaikutusta vaurioitumistodennäköisyyteen. Tästä on esimerkki kuvassa 2, joka on otettu raportista Brickstad (2000). Siinä on mallinnettu vuoto- ja murtumistodennäköisyyksien muutoksia, kun 28 käyttövuoden jälkeen on alettu toteuttaa entiseen tasoon nähden suorituskykyisempiä tarkastuksia. Kuva osoittaa selvästi tarkastusten tehokkuuden suuren merkityksen. Jotta näitä tarkasteluja päästään tekemään, on ensin kyettävä kvantifioimaan tarkastuksen suorituskyky. Kuvassa 2 on esitetty myös POD -käyrät, joita on käytetty tarkastusten vaikutusta mallinnettaessa.

Teknisessä perustelussa on mahdollista käyttää tukena aikaisemmista tarkastuksista kertynyttä kokemusta ja tietoa menetelmän toimivuudesta sekä suorituskyvystä. Myös itse tarkastuksesta saatujen kokemusten ja tulosten vertailu ja linkittäminen eli eräänlainen takaisinkytkentä päteväintiin saattaa joissain tapauksissa olla hyödyllistä. Etukäteen suunnitellun tarkastusohjeen toimivuus todellisissa olosuhteissa todetaan itse tarkastuksessa. Jos vikoja havaitaan, voidaan niiden todentamiseen ja koonmäärittämiseen käyttää muita rikkomattomia tai rikkovia tutkimuksia. Näin on mahdollista saada hyvin käyttökelpoista lisänäyttöä tarkastusjärjestelmän suorituskyvystä. Näiden tietojen perusteella voi olla hyödyllistä arvioida ja tarkentaa päteväinnissä saatuja tuloksia. Samalla täydentyy kuva tarkastuksen tehokkuudesta, jolloin tarkastusten vaikutusta kokonaisriskiä alentavana tekijänä voidaan arvioida tarkemmin.



Kuva 2. Tarkastuksen tehokkuuden vaikutus vuoto- ja murtumistodennäköisyyksiin. Oikealla olevassa kuvassa on esitetty POD-käyrät, joita on käytetty kuvaamaan eritasoisten tarkastusten suorituskykyä (Brickstad 2000).

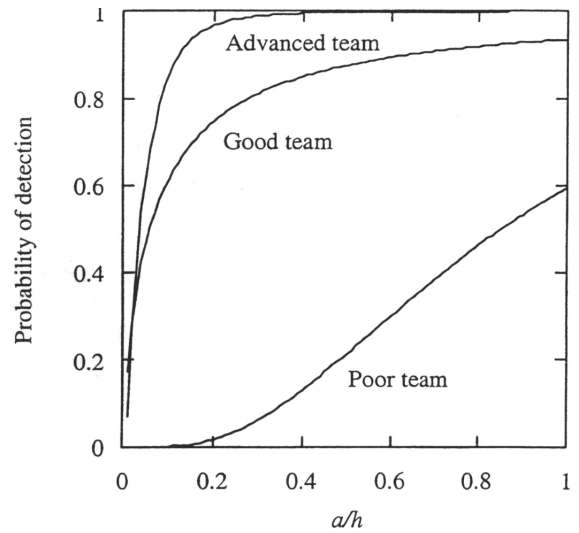
3.3 YVL-henkilöpatvöinneissä saatuja tuloksia

Suomessa edellytetään ultraäänitarkastajilta, jotka tekevät ydinvoimaloissa austeniittista materiaalia oleville kohteille tarkastuksia, osallistumista erityiseen kurssiin ja sen jälkeen sokkokokeen hyväksyttävää suorittamista. Käytäntöön liittyviä henkilöpatvöintejä on järjestetty vuodesta 1997 alkaen. Koekappaleet jäljittelevät turvallisuusluokkaan 1 kuuluvia kohteita ja niiden materiaalina on käytetty muokattua austeniittista terästä. Koekappaleiden tarkastuskohteet sisältävät enimmäkseen putki/putki-liitoksia, mutta varsinkin viime vuosina on otettu mukaan myös putki/yhde-liitoksia. Kohteiden halkaisijat vaihtelevat alueella 57–568 mm ja seinämänpaksuudet 5–52 mm. Viat, joita koekappaleissa on käytetty, ovat pääasiassa keinotekoisesti valmistettuja väsytyks- ja jännityskorroosiosäröjä.

Vuosina 1997–2002 kertyneestä tenttiaineistosta on muodostettu vikojen havaitsemistodennäköisyyttä esittävät kuvaajat. Kuvaajat on muodostettu käyttäen artikkelissa Simola & Pulkkinen (1998) esitettyä funktiota:

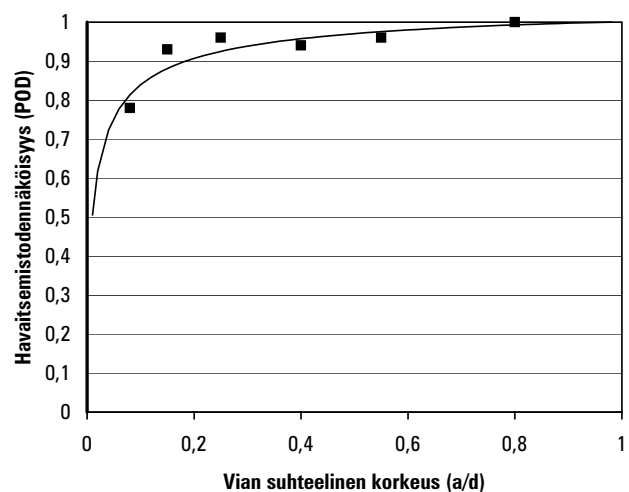
$$POD(a/d) = \Phi\left(c_1 + c_2 \ln\left(\frac{a}{d-a}\right)\right), c_1 \in R, c_2 \geq 0 \quad (1)$$

jossa Φ on kumulatiivinen normaalijakauma, a vian korkeus, d materiaalin paksuus ja c_1 sekä c_2 ovat mallin parametreja. Kuvaaja vuosien 1997 ja 1998 tulosaineistosta on esitetty kuvassa 3. Se on



sovitettu kuvassa näkyvien datapisteiden kautta, jotka esittävät kokeissa saavutettuja havaitsemistodennäköisyyksiä eri vikasyvyysalueilla. Käyrän sovituksessa parametreille saatiin arvot: $c_1 = 1,89$ ja $c_2 = 0,41$.

Patvöintitutkinnoissa vuosina 1997 ja 1998 saadut tulokset ovat erittäin hyviä. Havaitsemistodennäköisyyden voidaan todeta sijoittuvan taupausten "Good team" ja "Advanced team" välille verrattaessa sitä kuvassa 2 esitettyihin kuvaajiin.

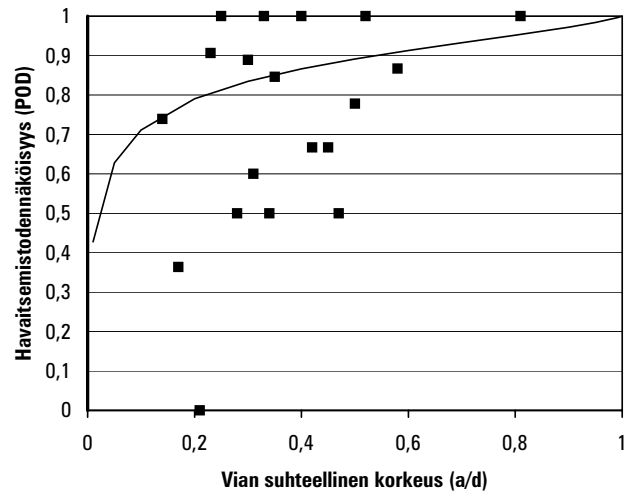


Kuva 3. Vikojen havaitsemistodennäköisyys YVL-sokkokokeissa (manuaalinen UT-tarkastus austeniittisille kohteille) vuosien 1997 ja 1998 aineistosta. Pisteet ilmaisevat kokeissa saavutettuja tuloksia ja yhtenäinen viiva näiden perusteella mallinnettua todennäköisyyttä kaavan (1) mukaan.

Hyvään tulokseen on osaltaan vaikuttanut se, että tässä aineistossa tutkittavat liitokset olivat putki/putki-hitsejä ja ne päästiin luotaamaan molemmilta puolilta. Lisäksi tässä aineistossa ei ole mukana niitä tuloksia, jotka johtivat kokelaan hylkäämiseen tutkinnossa.

Vastaavasti vuosien 2000 - 2002 aineistosta on muodostettu havaitsemistodennäköisyyttä esittävä kuvaaja (kuva 4). Käyrän sovituksessa parametreille saatiin arvot: $c_1 = 1,23$ ja $c_2 = 0,31$.

Havaitsemistodennäköisyys on näidenkin tulosten perusteella varsin hyvä, mutta kuitenkin matalampi kuin aikaisempien vuosien perusteella saatu tulos. Tähän on todennäköisesti vaikuttanut se, että käytössä oli monipuolisempi valikoima koekappaleita. Tällöin tarkastuskohteiden joukossa on ollut putki/putki-liitosten lisäksi myös putki/yhde-liitoksia. Toisin kuin edellistä kuvaajaa muodostettaessa tässä aineistossa ovat mukana kaikki koesuoritukset eli myös pätevöintikokeessa hylättyjen kokelaiden tulokset.



Kuva 4. Vikojen havaitsemistodennäköisyys YVL-sokkokeissa (manuaalinen UT-tarkastus austeniittisille kohteille) vuosien 2000–2002 aineistosta. Pisteet ilmaisevat kokeissa saavutettuja tuloksia ja yhtenäinen viiva näiden perusteella mallinnettua todennäköisyyttä kaavan (1) mukaan.

4 Yhteenveto

Ydinvoimaloiden määräaikaistarkastuksissa on pyrkiminen kohti tarkastuskohteiden riskitietoista valintaa ollut tärkeä kehityssuunta jo usean vuoden ajan. Yhdysvalloissa on alettu soveltaa riskitietoisten määräaikaistarkastusten periaatteita jo laajasti. Euroopassa on asiaa selvitetty ja tutkittu kansainvälisten työryhmien ja projektien kautta. Lisäksi on toteutettu useita pilot-hankkeita, joissa riskitietoista tarkastuskohteiden valintamenetelmiä on sovellettu laitosten järjestelmiin. Tällä hetkellä näyttää Euroopassa olevan pyrkimys kohti yhteisiä suosituksia, joita voidaan odottaa syntyvän ENIQ:n, NRW:n ja EU:n projektien työn tuloksena.

Toinen erittäin merkittävä kehityshanke määräaikaistarkastusten alueella on ollut päteväntikäytäntöjen luominen ja niiden käyttöönotto eri maiden kansallisissa järjestelmissä. Pätevöinnin ja riskitietoisen tarkastuskäytännön välillä on nähtävissä eräitä merkittäviä yhteyksiä. Riskitietoisen tarkastuskohteiden valinta edellyttää perinpohjaista selvityksiä kohteena olevien järjes-

telmien osalta, jolloin kertyy myös tarkastusten kannalta hyödyllistä tietoa esimerkiksi mahdollisista vauriomekanismeista, vikojen esiintymisalueilta, tarkastettavien alueiden materiaaleista ja rakenteista, luoksepäästävyyydestä jne. Nämä ovat tärkeitä tietoja tarkastusten suunnittelun kannalta ja huomattava osa niistä on käyttökelpoista aineistoa koottaessa pätevöinnin lähtötietoja. Pätevöinnin avulla osoitetaan tarkastusjärjestelmän suorituskyky ja tätä tietoa voidaan taas käyttää arvioitaessa tehokkuutta, jolla tehty tarkastus alentaa vaurioiden esiintymisriskiä.

Tarkastajat, jotka suorittavat suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla ultraäänitarkastuksia austeniittisille hitseille, joutuvat suorittamaan erillisen pätevöinnin. Pätevöinti toteutetaan henkilökohtaisena sokkokeena. Käyttäen materiaalina näistä kokeista kertynyttä aineistoa on raportin loppuosassa esitetty havaitsemistodennäköisyyksiä, joita näissä pätevöintikokeissa on saavutettu. Kokeissa saavutetut havaitsemistodennäköisyydet ovat olleet tasoltaan korkeita.

Lähdeviitteet

- Ammirato, F. 2001. NDE in the US nuclear industry – Trends and emerging issues. 3rd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components. November 14–16, 2001, Seville, Spain. CD-ROM.
- Brickstad, B. 2000. The use of risk based methods for establishing ISI-priorities of piping components at Oskarshamn 1 nuclear power station. Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI), Stockholm, Sweden. SKI report 00:48. 83 s.
- ENIQ 2000. Discussion document on risk informed in-service inspection of nuclear power plants in Europe. European Commission, Directorate-General JRC, Joint Research Centre, Petten, the Netherlands. ENIQ Report nr. 21. EUR 19742 EN.76 s.
- NRWG 1999. Report on risk-informed in-service inspection and in-service testing. The Nuclear Regulators' Working Group Task Force on Risk-Based In-Service Inspection. European Commission, Nuclear safety and the environment. DG XI, Environment, Nuclear Safety and Civil Protection. EUR 19153 EN. 56 s.
(http://europa.eu.int/comm/energy/nuclear/pdf/risk_inf_inservice_insp.pdf)
- RIBA 2001. Risk-informed approach for in-service inspection of nuclear power plant components. Osa 1: Project Summary (8 s.); osa 2: Task 1: Final Report, Review of Existing Risk-Informed Methodologies (47 s.); osa 3: Task 2: Final Report, A Comparative Study of Risk-Informed In-Service Inspection Applications (68 s.); osa 4: Task 3: Final Report, Conclusions and Recommendations for Risk-Informed In-Service Inspection Methodology Applied to Nuclear Power Plants in Europe (83 s.). EU Commission, Nuclear safety and the environment. EUR 20164.
(<http://europa.eu.int/comm/energy/nuclear/synopses.htm#20164>)
- Mononen, J., Julin, A., Rantala, R., Valkeajärvi, O., Niemelä, I., Hinttala, J., Salo, P., Virolainen, T., Virolainen, R. 2001. Pilot-tutkimus tarkastustoiminnan (in-service inspection) kohteiden riskiavusteisesta priorisoinnista. Teoksessa: Riskiavusteisen valvonnan kehittäminen Säteilyturvakeskuksessa. Säteilyturvakeskuksen loppuraportti (sisäinen raportti). Säteilyturvakeskus, Helsinki. 84 s.
- Pulkkinen U, Simola K. 2000. An expert panel approach to support risk-informed decision making. Säteilyturvakeskus, Helsinki. STUK-YTO-TR 172. 18 s. (<http://www.stuk.fi/julkaisut/tr/stuk-yto-tr172.html>)
- Simola, K., Pulkkinen, U. 1998. Models for non-destructive inspection data. Reliability Engineering and Systems Safety. Vol. 60 (1998): 1–12.
- Tupala, M. 2002. Ydinvoimalaitoksen riskitietoinen putkistotarkastusten optimointi. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 53 s.