

Ydinvoimalaitosten paine- astioiden määräaika- tarkastuksissa käytettävien NDT-järjestelmien pätevänti

Kai Elfving

Tutkimuksen yhteyshenkilö Säteilyturvakeskuksessa **Olavi Valkeajärvi**

STUK:n raporttisarjoissa esitetyt johtopäätökset ovat tekijöiden johtopäätöksiä, eivätkä ne välttämättä edusta Säteilyturvakeskuksen virallista kantaa.

ISBN 951-712-280-2

ISSN 0785-9325

Oy Edita Ab, Helsinki 1998

ELFVING, Kai. Ydinvoimalaitosten paineastioiden määräaikaistarkastuksissa käytettävien NDT-järjestelmien pätevänti. STUK-YTO-TR 148. Helsinki 1998. 59 s. + liitteet 29 s.

ISBN 951-712-280-2

ISSN 0785-9325

Avainsanat: NDT, pätevänti, rikkomaton tarkastus, paineastia, ydinvoimalaitos, määräaikaistarkastus, terminen väsytyt, särön valmistus

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytteen tavoitteena on määritellä NDT-järjestelmien eurooppalaisen päteväntitavan vaatimukset ja niiden toteutettavuus käytännössä sekä selvittää mahdollisuudet koekappaleissa käytettävien vikojen valmistukseen. Päteväntivaatimusten selvittäminen tehtiin kirjallisuustutkimuksena. Teoriaosuudessa esitetään viranomaisten ja luvanhaltijoiden työryhmien valmistelemien asiakirjojen vaatimukset. Lisäksi esitetään lyhyesti ASME Code, Section XI päteväntivaatimukset sekä vertaillaan sen ja eurooppalaisen päteväntitavan suurimpia eroja. Pätevänti eurooppalaisen päteväntitavan mukaan koostuu teknisistä perusteluista ja käytännön kokeista. Teknisillä perusteluilla tarkoitetaan sitä todistusaineistoa, joka tukee NDT-menetelmän, käytännön kokeiden laajuuden, koekappaleiden ja niissä olevien vikojen valintaa sekä selvittää tarkastuskohteen asettamia rajoituksia. Käytännön kokeilla osoitetaan valitun menetelmän ja henkilöstön suorituskyky vaadittavien vikojen havaitsemisessa ja määrittämisessä käyttämällä teknisissä perusteluissa esitettyjä koekappaleita. Päteväntin keskeisimpinä vaatimuksina voidaan pitää käytännön kokeissa käytettävissä koekappaleissa olevien vikojen edustavuutta verrattuna todellisiin vikoihin, koska käyttämällä todellisuutta vastaavia vikoja pystytään osoittamaan tarkastusmenetelmän todellinen suorituskyky vaadittavien vikojen havaitsemisessa ja määrittämisessä. Tekniset perustelut ovat myös päteväntin keskeisimpiä vaatimuksia, koska niissä perustellaan valittujen vikojen ja menetelmän käyttö. Ydinvoimalaitosten perus- ja määräaikaistarkastuksissa käytettävien tarkastusmenetelmien päteväntistä on Suomessa aikaisemmin tehty yksi tutkimus, joka käsitteli ASME Code, Section XI Appendix VIII:n ja VII:n mukaisia vaatimuksia.

Koekappaleissa käytettävien vikojen valmistettavuutta tutkittiin työn kokeellisessa osuudessa. Säröjen valmistusmenetelmäksi valittiin terminen väsytyt. Kyseistä laitteistoa ei ole aikaisemmin käytetty säröjen valmistukseen. Kokeellisessa osuudessa suoritettavat kokeet osoittivat, että käytetyllä laitteistolla saadaan aikaiseksi säröjä, joiden ominaisuudet vastaavat käytössä syntyneiden säröjen ominaisuuksia ja jotka näin ollen soveltuvat käytettäväksi päteväntikoekappaleissa. Säröille suoritettujen ultraäänitarkastusten epäonnistuminen koon määrittämisessä osoittaa, että päteväntittäminen on perusteltua. Päteväntittämiselle NRWG:n edellyttämien vaatimusten mukaan ei löytynyt teknisiä esteitä.

ELFVING, Kai. Qualification of NDT systems for in-service inspections of nuclear power plant pressure vessels. STUK-YTO-TR 148. Helsinki 1998. 59 pp. + Appendices 29 pp.

ISBN 951-712-280-2

ISSN 0785-9325

Keywords: non-destructive testing, qualification, pressure vessel, nuclear power plant, in-service inspection, thermal fatigue, crack manufacturing

ABSTRACT

The goal of this thesis is to determine the requirements of the in-service inspection qualification in Europe and their feasibility in practice and to find out possibilities to manufacture defects in test pieces used in practical trials. The literature study consists of qualification requirements set by European regulators and by the European nuclear power utilities. Also a brief summary of qualification requirements set by ASME Code, Section XI and comparison between ASME and European qualification requirements is included in the literature study. The qualification according to the document prepared by the European nuclear regulators consists of technical justifications and practical trials. Technical justification is the documented evidence supporting the capability assessment of the NDT system, the extent of practical trials, the test pieces and chosen defects. Practical trials are a performance demonstration of an NDT system and personnel using qualification test blocks representing the component and the defective condition determined in technical justifications. One of the most essential qualification requirements is the representativeness of the chosen defects with real ones, because by using defects resembling real ones the real performance of NDT system can be measured. Technical justifications are also one of the most essential items in qualification, because they determine the defects used in test blocks and the NDT system used to detect and specify the defects. One study about the qualification of NDT systems for pre- and in-service inspections of nuclear plants has been made in Finland before. That study consisted of the qualification requirements set by ASME Code, Section XI Appendices VII and VIII.

Possibilities of manufacturing defects were examined in the experimental part of this thesis. The method for manufacturing defects was thermal fatigue. The equipment used in the experimental part of this thesis has not been used for manufacturing defects before. The results obtained in the experiments proved that defects resembling actual defects can be manufactured by using thermal fatigue. Failure in sizing the cracks gained in the experimental part of this thesis by ultrasonic testing pointed out the need for qualification. There are no technical obstacles in performing the qualification according to the requirements set by NRWG.

ESIPUHE

Tämä opinnäyte on tehty Säteilyturvakeskuksen ydinvoimalaitosten valvontaosastolla.

Työn valvojana on toiminut Helsingin Teknillisen korkeakoulun Konetekniikan osaston materiaalitekniikan professori Hannu Hänninen sekä ohjaajina ylitarkastaja Olavi Valkeajärvi Säteilyturvakeskuksesta ja erikoistutkija Pentti Kauppinen Valtion Teknillisestä Tutkimuskeskuksesta. Heitä kaikkia haluan kiittää saamastani tuesta ja neuvoista.

Säteilyturvakeskuksen ydinturvallisuusosaston henkilökuntaa haluan kiittää miellyttävästä työilmapiiristä ja arvokkaista neuvoista, mitkä ovat edesauttaneet työn valmistumista. Tutkija Mika Kempaiselle Teknillisen korkeakoulun Konetekniikan osaston materiaaliopin laboratoriosta haluan lausua erityiset kiitokset urheilusuoritukseen verrattavista ponnisteluista kokeiden suorittamiseksi.

Lämpimimmät kiitokset vanhemmilleni koko opiskeluajan kestäneestä kannustuksesta ja avusta.

Helsingissä elokuun 20. päivänä 1998

Kai Elfving

LYHENTEET

ALARA	As Low As Reasonably Achievable, säteilyn alaisessa työssä noudatettava säteilysuojeluperiaate
ASME	The American Society of Mechanical Engineers
CEC	Commission of European Communities
ENIQ	European Network for Inspection Qualification, ydinvoimalaitosten luvanhaltijoiden johtama päteväintityöryhmä
IASCC	Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking, säteilyn edistämä jännityskorroosio
IDSCC	Interdendritic Stress Corrosion Cracking, dendriittien välissä etenevä jännityskorroosio
IGSCC	Intergranular Stress Corrosion Cracking, raerajoja pitkin etenevä jännityskorroosio
LWR	Light Water Reactor, kevytvesireaktori
NDT	Non-Destructive Testing, ainettarikkomaton testaus
NRWG	The Nuclear Regulators Working Group, eurooppalaisten ydinturvallisuusviranomaisten työryhmä
PDI	Performance Demonstration Initiative, USA:n ydinvoimalaitosten luvanhaltijoiden yhteisorganisaatio päteväintivaatimusten soveltamiseksi käytäntöön
PISC I, II, III	Plate Inspection Steering Committee, kansainväliset ainettarikkomattomien tarkastusten luotettavuustutkimukset
PVRC	US Pressure Vessel Research Committee
RMS	root mean square, neliöllinen keskiarvo
RRT	round robin trials, monilaboratoriokokeet
SEM	elektronimikroskooppi
SKI	Statens Kärnkraftinspektion, Ruotsin ydinturvallisuus viranomainen
SRD	Safety and Reliability Directorate of the United Kingdom Atomic Energy Authority
STUK	Säteilyturvakeskus
SwRI	Southwest Research Institute
TGSCC	Transgranular Stress Corrosion Cracking, rakeiden läpi etenevä jännityskorroosio
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus
YVL-ohje	Säteilyturvakeskuksen laatima ohje, jota luvanhaltijan tulee noudattaa ellei Säteilyturvakeskukselle ole esitetty muuta hyväksyttävää menettelytapaa, jolla vastaava turvallisuustaso saavutetaan

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ESIPUHE	5
LYHENTEET	6
1 JOHDANTO	9
1.1 Työn tausta	9
1.2 Työn tavoitteet ja rajaus	9
2 PÄTEVÖINTIIN JOHTANEET TEKIJÄT	11
3 LÄHTÖKOHTA PÄTEVÖINNILLE	12
3.1 The Nuclear Reculators Working Group (NRWG)	12
3.1.1 Sovellutusalue	12
3.1.2 NDT-pätevöinnin rooli ja tavoitteet	12
3.1.3 Peruspätevöintivaatimusten kehittämisperiaatteet	13
3.1.4 Pätevöintimenettelyt, kriteerit ja pätevyys	13
3.1.5 Asiakirjat ja todistukset	15
3.1.6 Pätevöintiorganisaatiot ja niiden velvollisuudet	16
3.2 European Network for Inspection Qualification (ENIQ)	17
3.2.1 Pätevöintiperiaatteet	17
3.2.2 Pätevöintiäsiakirjat ja pätevöinnin toteutus	18
3.2.3 Pätevöintitodistukset	20
3.2.4 Pätevöintiin osallistuvien osapuolten vastualueet	21
3.3 ASME:n pätevöintivaatimukset	22
3.3.1 ASME Code, Section XI:sta edellyttämä pätevöinnin laajuus	22
3.3.2 Henkilöstön pätevöinti, Appendix VII	22
3.3.3 Menetelmän pätevöinti, Appendix VIII	23
3.4 ASME vs NRWG	23
4 PÄTEVÖINNIN SUORITTAMINEN	25
5 TEKNISET PERUSTELUT	26
5.1 Teknisten perustelujen määritelmä	26
5.2 Teknisten perustelujen tarkoitus	26
5.2.1 Koekappaleiden ja vikojen tekniset perustelut	26
5.2.2 Tarkastusohjeen tekniset perustelut	27
5.2.3 Tarkastuslaitteiden tekniset perustelut	27
5.3 Teknisten perustelujen rakenne	27
5.4 Olennaiset muuttujat	27
5.4.1 Koekappaleiden ja vikojen olennaiset muuttujat	28
5.4.2 Tarkastusohjeen olennaiset muuttujat	28
5.4.3 Tarkastuslaitteiston olennaiset muuttujat	28
6 KÄYTÄNNÖN KOKEET	30
6.1 Tarkastusmenettelyn pätevöinti	30
6.2 Tarkastajien pätevöinti	30

7	KOEKAPPALEIDEN VALMISTUS	32
7.1	Vikatyyppit	32
7.1.1	Mekaaninen väsyminen	32
7.1.2	Terminen väsyminen	33
7.1.3	Korroosioväsyminen	36
7.1.4	Jännityskorroosio	36
7.2	Vikojen valmistustavat	37
7.2.1	Vikojen istuttaminen	37
7.2.2	Hitsaamalla valmistetut viat	38
7.2.3	Muita menetelmiä	38
8	KOKEELLINEN OSUUS	39
8.1	Koelaitteisto	39
8.1.1	Kuumennuskela	39
8.1.2	Lämpötilan kalibrointi	39
8.2	Koekappaleet	40
8.2.1	Perusaine koekappaleet	40
8.2.2	Hitsatut koekappaleet	40
8.3	Koeohjelma ja tulokset	41
8.3.1	Koe 1	42
8.3.2	Koe 2	46
8.3.3	Koe 3	46
8.3.4	Koe 4	48
8.3.5	Koe 5	48
8.3.6	Koe 6	49
8.3.7	Ultraäänitarkastukset	49
8.4	Tulosten tarkastelu	50
8.5	Lisätutkimustarve	54
9	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	56
	VIITTEET	58
	LIITTEET	

Sivut 40, 42-45, 47-49, 52 ja 55 sekä liitteet 2-4 puuttuvat.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Kansainvälisissä rikkomattomien tarkastusmenetelmien luotettavuustutkimuksissa on tullut esille selviä puutteita vikojen havaitsemisessa ja määrittämisessä. Tämä on johtanut erilaisiin projekteihin rikkomattomien tarkastusmenetelmien laadun parantamiseksi. Amerikkalainen ASME (The American Society of Mechanical Engineers) Code, Section XI Appendix VIII esittää vaatimukset ultraäänitarkastusten pätevoimiseksi. Euroopassa on perustettu työryhmiä selvittämään kuinka pätevänti tulee hoitaa. Euroopan unionin ydinvoimavaltioiden ja Sveitsin ydinturvallisuusviranomaiset ovat perustaneet työryhmän nimeltään The Nuclear Regulators Working Group (NRWG), joka on julkaissut yhteisraportin viranomaisten näkemyksestä pätevoinnin suhteen. Euroopan Unionin ydinvoimalaitosten luvanhaltijat ovat puolestaan perustaneet työryhmän European Network for Inspection Qualification (ENIQ) kehittämään päteväntikäytäntöä. Suomessa on perustettu kehitysryhmä suunnittelemaan tänne soveltuvaa käytäntöä. Kehitysryhmään kuuluvat voimayhtiöiden ja suurten tarkastusyhtiöiden edustajat sekä viranomainen tarkkailijajäsenenä. Säteilyturvakeskus (STUK) on asettanut päätöksillään C5222/81, C5222/61, A5222/120 ja A5222/72 21.10.1996 NRWG:n raportin vähimmäisvaatimustasoksi Suomessa tehtävissä pätevoinneissä. Ydinvoimalaitosten paineastioiden perus- ja määraaikaistarkastuksissa käytettävien rikkomattomien tarkastusmenetelmien pätevoinnistä on Suomessa tehty aikaisemmin yksi tutkimus, joka käsittelee ASME Code, Section XI Appendix VII:n ja Appendix VIII:n esittämiä vaatimuksia.

Kansainvälisissä luotettavuustutkimuksissa ilmenneistä ongelmista huolimatta ei NDT-tarkastusten epäonnistuminen ole tiettävästi aiheuttanut vakavia ydinvoimalaitosonnettomuuksia. Tämä ei kuitenkaan vähennä pätevoinnin tärkeyttä, koska eihän vakavan onnettomuuden tapah-

tuminen saa olla edellytys laadun ja luotettavuuden parantamiselle varsinkaan, kun on kysymys niinkin vakavasta ja pahimmillaan suurta tuhoa aiheuttavasta asiasta kuin ydinvoimalaitosonnettomuus on. Asia on ajankohtainen, koska parhailaan ollaan kehittämässä päteväntikäytäntöä Suomeen ja ensimmäisiä kokemuksia muualla suoritetuista pätevoinneistä on saatu.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Työn tavoitteena on määritellä rikkomattomien tarkastusmenetelmien pätevoinnissä huomioon otettavia asioita. Työn tarkoituksena on myös tarjota tietoa pätevoinnistä suomen kielellä, koska asiasta ei ole aikaisempia suomenkielisiä julkaisuja. Päteväntikäytäntö on Suomessa ensisijaisesti tarkoitus ottaa käyttöön ydinvoimalaitosten ohjeen YVL 3.8 [1] mukaisissa paineastioiden määraaikaistarkastuksissa. Lähtökohtana on STUK:n päätöksen mukaan pätevoiminen eurooppalaisen viranomaisnäkemysten mukaan. Tällöin pätevänti jakaantuu kahteen eri osaan, eli tekniisiin perusteluihin ja käytännön kokeisiin, joihin liittyviä yksityiskohtia tässä työssä selvitetään. Pätevoinnin tarkoituksena on koko tarkastusjärjestelmän pätevänti, eli tarkastuslaitteiden, tarkastusohjeen, mahdollisen ohjelmiston sekä henkilöstön pätevänti.

Työssä on keskitytty selvittämään eurooppalaisen päteväntitavan vaatimuksia ja yksityiskohtia, koska sitä tapaa tullaan soveltamaan suomalaisen päteväntiin. Myös ASME:n [2] päteväntivaatimuksia on käyty lyhyesti läpi, sen ja eurooppalaisen tavan suurimpien erojen selvittämiseksi. Pätevoinnin vaatimuksia, vastuualueita ja toteuttamista käytännössä on tutkittu laajasti, koska Suomessa ei ole vielä hyväksyttyä päteväntikäytäntöä. Tutkimus on tehty kirjallisuustutkimuksena, jossa on selvitetty NRWG:n ja ENIQ:n asiakirjojen näkemystä pätevoinnistä ja teknisissä perusteluissa käsiteltäviä yksityiskoh-

tia. Pätevöinnin yksityiskohtia käydään läpi niin, että esitetyjä periaatteita voidaan soveltaa kaikkien rikkomattomien tarkastusmenetelmien päteväntiin. Asioiden selventämiseksi esimerkkinä käytetään ultraäänitarkastusta tutkittaessa päteväinnissä huomioon otettavia yksityiskohtia. Esimerkit on rajattu käsittämään vain ultraäänitarkastukset siksi, että ensimmäiset päteväinnit tullaan tekemään ultraäänitarkastuksille. Kirjallisuustutkimuksessa on myös esitetty käytössä syntyneiden vikojen ominaisuuksia, jotta saataisiin taustatietoa päteväntikoeleikkapaleissa olevien vikojen vaatimuksista. Erilaisia säröjen valmistusmenetelmiä on myös tutkittu kirjallisuudesta saa-

tujen tietojen perusteella, mutta aineistoa aiheesta on julkaistu vähän.

Yksi päteväinnin keskeisimmistä kysymyksistä on käytännön kokeissa käytettävien koekappaleiden ja niissä olevien vikojen valmistus sekä niiden edustavuus verrattuna todelliseen tarkastuskohteeseen. Tästä johtuen tämän työn kokeellinen osuus koostuu vikojen valmistamisesta termisellä väsytyksellä ja saatujen säröjen arvioimisesta päteväinnin kannalta. Tavoitteena oli tutkia vastaavatko termisellä väsytyksellä kasvaneiden säröjen ominaisuudet käytössä syntyneiden säröjen ominaisuuksia, sekä voidaanko niillä mahdollisesti simuloida myös muita vikatyyppejä.

2 PÄTEVÖINTIIN JOHTANEET TEKIJÄT

Vuonna 1965 the US Pressure Vessel Research Committee (PVRC) käynnisti tutkimukset ultraäänitarkastuksen luotettavuuden selvittämiseksi vikojen havaitsemisessa ja määrittelyssä. Vuoteen 1968 mennessä oli valmistettu kaikkiaan 12 koekappaletta. Ensimmäisissä tutkimuksissa ei saatu käyttökelpoisia tuloksia. Vuonna 1974 aloitettiin uudet ASME Code, Section XI mukaiset kokeet, joiden vaatimuksia oli huomattavasti tiukennettu PVRC:n ainetta rikkomattoman tarkastuksen ohjeiden mukaan. Vuonna 1975 kolmea koekappaletta tarjottiin SRD:n (Safety and Reliability Directorate of the United Kingdom Atomic Energy Authority) kautta CEC:lle (Commission of European Communities). Tästä sai alkunsa eurooppalainen ohjelma The Plate Inspection Steering Committee (PISC I, 1975–1980). Siihen otti osaa 34 tarkastusyriytystä kymmenestä Euroopan maasta, USA:sta ja Japanista. PISC I:n tavoitteena oli selvittää ASME Code, Section XI, Edition 1974 esittämän ultraäänitarkastustekniikan tehokkuus vaadittujen vikojen havaitsemiseksi ja määrittämiseksi. Tässä ensimmäisessä vaiheessa keskityttiin paksuseinämäisen reaktoripaineastian tarkastuksessa käytettävien tarkastusmenetelmien luotettavuuden arviointiin. Kokeissa käytettiin paksuja koekappaleita, jotka jäljittelivät reaktoripaineastian osia. Koekappaleissa olevat viat olivat keinotekoisia. Tarkastusmenetelmissä havaittiin puutteita.

PISC I:ssä käytettyjen vikojen samankaltaisuudesta ja projektin rajoituksista sekä ASME:n nähdessä vaihtoehtoisilla menetelmillä saaduista tuloksista johtuen todettiin olevan tarvetta laajempiin tutkimuksiin. Tämän seurauksena käynnistettiin PISC II, jonka nimeksi tuli The Programme for the Inspection of Steel Components (1981–1986). Siihen otti osaa 15 Euroopan maata, USA ja Japani. Osana PISC II:een kuuluivat monilaboratoriokokeet (round robin trials) ja parametritutkimukset, jotka ovat monilaboratoriokokeisiin kytkettyjä yksittäisen muuttujan vaikutusta arvioivia kokeita. Tavoitteena oli käytössä ja

kehitteillä olevien reaktoripaineastian määräämiskaistarkastustekniikoiden tehokkuuden arviointi käytössä syntyneiden vikojen havaitsemisessa ja määrittelyssä. Tavoitteena oli myös yleisesti hyväksyttävissä olevien laaduntarkastus- ja määräämiskaistarkastustekniikoiden määrittely sekä johtopäätösten saattaminen säännöstö- ja standardisointielinten tietoon. PISC II:n yhteydessä tehdyt monilaboratoriokokeet osoittivat, että rikkomattomien tarkastusmenetelmien parantaminen oli mahdollista. Kokeiden perusteella ehdotettiin seuraavia muutoksia ASME-standardiin: 50% DAC sijasta 20% DAC ja etsittävien vikojen mukaisen tekniikan käyttö, esimerkiksi 70° SEL-luotain. Vuonna 1986 ehdotetut muutokset otettiin mukaan ASME-standardiin. Kokeet osoittivat myös, että oli useita tarkastustekniikoita jotka täyttivät vaatimukset. [3]

PISC II:n yhteydessä suoritettujen parametritutkimukset vikojen ominaisuuksien vaikutuksista osoittivat seuraavien vikaominaisuuksien tärkeyden tarkastettavuuden kannalta: vikatyypin (tasomainen tai volumetrinen), särön kärjen muoto, särön/vian sijainti syvyysuunnassa, kallistuskulma ja pinnankarheus.

PISC III:ssä keskityttiin tarkastusten suorituskyvyn näyttämiseen koekappaleilla, joiden geometria vastaa todellisuutta ja jotka sisältävät realistisia vikoja. Ohjelma jaettiin kahdeksaan eri osaprojektiin. Osaprojekti 1 keräsi tuloksia kevytvesireaktorilaitosten pääkiertopiirien materiaaleissa ja rakenteissa syntyneistä vioista. Osaprojekti 2 tehtävänä oli vahvistaa PISC II:ssä saadut tulokset käyttämällä realistisempia tarkastusolosuhteita. Osaprojekti 3 tutki yhteiden ja kaksimetalliliitosten tarkastusta. Osaprojekti 4 käsitteli austeniittisten terästen tarkastusta. Osaprojekti 5 tutki höyrytimesten lämmönvaihtoputkien tarkastusta. Osaprojekti 6 käsitteli NDT:n matemaattista mallinnusta. Osaprojekti 7 tutki inhimillisten tekijöiden vaikutusta tarkastusten luotettavuuteen. Osaprojekti 8 tiedotti tuloksista säännöstö- ja standardisointielimille.

3 LÄHTÖKOHTA PÄTEVÖINNILLE

Seuraavassa esitellään eri organisaatioiden näkemyksiä pätevöinnistä ja siitä, kuinka se tulisi toteuttaa. Suomessa tullaan noudattamaan eurooppalaista pätevöintitapaa, joten sitä koskevat NRW:n ja ENIQ:n asiakirjat on käyty läpi yksityiskohtaisesti. Amerikkalaisen ASME-standardin mukainen tapa on esitetty lyhyesti, jonka jälkeen sitä on vertailtu eurooppalaiseen tapaan yleisellä tasolla.

3.1 The Nuclear Regulators Working Group (NRWG)

Euroopan Unionin jäsenmaiden ja Sveitsin ydin- turvallisuuksiviranomaisten työryhmän yhteisnäkemy- mystä NDT-järjestelmien pätevöinnistä edustaa asiakirja ”Common position of European regula- tors on qualification of NDT-systems for pre- and in-service inspection of light water reactor compo- nents”. Termi NDT-pätevöinti on asiakirjassa määritelty seuraavasti: järjestelmällinen arviointi käyttäen kaikkia niitä menetelmiä, joita tarvi- taan, jotta saadaan luotettava vahvistus sille, että NDT-järjestelmä on kykenevä toimimaan vaadi- tulla tasolla todellisissa tarkastusolosuhteissa. Asiakirjassa ei ole esitetty vaatimuksia siitä, mit- kä ydinvoimalaitoksen laitteet täytyy testata pä- tevöitetyllä tarkastusmenetelmällä, eikä myös- kään siitä mitä pätevöintitasoja tulee käyttää mil- lekin komponentille. Nämä asiat tullaan määrit- telemään kansallisella tasolla. Asiakirjan tarkoi- tus on tarjota lähtökohta viranomaisnäkökantaan perustavalle pätevöintimenettelyjen ja -ohjelmien kehitystyölle. Sen tarkoituksena on myös tiedot- ta viranomaisnäkökannasta muille asianomaisil- le organisaatioille. Asiakirjan vaatimukset on esi- tetty sellaisenaan seuraavissa kappaleissa. [4]

3.1.1 Sovellutusalue

Asiakirja esittää yhteisnäkemyksen NDT-järjes- telmien pätevöinnistä, jota tullaan käyttämään LWR-laitosten turvallisuuteen vaikuttavien kom- ponenttien perus- ja määräaikaistarkastuksissa. NDT-järjestelmä on määritelty seuraavasti: ”kaik-

ki rikkomattoman aineenkoetusjärjestelmän osat (laitteisto, ohjelmisto, NDT-ohje ja henkilöstö), jot- ka voivat vaikuttaa testauksen tulokseen ja laa- tuun”. Näitä periaatteita voidaan käyttää myös muissa tarkastustilanteissa tai muiden ydinvoi- malaitostyyppien tarkastuksissa. Asiakirja käsit- telee NDT-pätevöinnin roolia ja tarkoitusta, pe- ruspätevöintivaatimusten kehittämisperiaatteita sekä NDT-järjestelmien eri osien pätevöinnissä käytettäviä menettelyjä. Asiakirjassa esitetyt nä- kemykset kohdistuvat ultraäänimenetelmiin, mutta periaatteita voidaan soveltaa myös muiden rikkomattomien tarkastusmenetelmien pätevöin- nissä.

3.1.2 NDT-pätevöinnin rooli ja tavoitteet

Ydinvoimalaitosten ikääntyessä määräaikaistar- kastuksista on tullut tärkeä osa mekaanisten komponenttien jäljellä olevan eliniän arviointia. Määräaikaistarkastusten luotettavuus riippuu myös muista tekijöistä kuin NDT-menetelmien luotettavuudesta, kuten tarkastusten tavoittees- ta, jaksotuksesta ja käytettävistä hyväksymiskri- teereistä.

Käytettyjen NDT-menetelmien luotettavuus taas riippuu useista asioista, kuten

- tarkastuskohteen luonteesta ja luoksepäästä- vyydestä,
- etsittävien vikojen luonteesta,
- käytetyn tarkastusmenetelmän valinnasta,
- NDT-laitteen ja tarkastusohjeen optimoinnista tarkastuskohteen, etsittävän vikatyypin ja tar- kastuskohteen ympäristöolosuhteiden suhteen,
- tarkastushenkilöstön toiminnasta, joka sisäl-

tää fysiologiset ja psykologiset tekijät.

NDT-menetelmien päteväinnillä on tarkoitus todistaa, että kyseisellä menetelmällä on mahdollista havaita tietyille tarkastuskohteelle ominaiset viat, jotka on tarkastusohjeessa määritelty. Pelkkä menetelmien, laitteiden, tarkastusohjeiden ja henkilöstön päteväinti ei vielä takaa onnistunutta lopputulosta, vaan todellisissa tarkastustilanteissa tapahtuva laadunvarmistus ja tarkastustoimenpiteiden valvonta ovat yhtä tärkeitä vaaditun luotettavuuden saavuttamiseksi.

3.1.3 Peruspäteväintivaatimusten kehittämisperiaatteet

Päteväintivaatimusten on perustuttava tarkastuskohteen turvallisuusmerkitykselle sekä tarkastuksen tarkoitukselle. Peruspäteväintivaatimusten pohjana tulisi olla laitosdokumentaatio, kuten turvallisuusseloste, turvallisuusluokitus, lujuusanalyysi jne. Huomioon tulisi ottaa myös NDT-menetelmältä vaadittava tarkkuus, sekä tarkastuskohteen odotettavat vauriomekanismit ja odotettavissa olevien vikojen tyyppi, sijainti, suuntautuneisuus, koko ja muoto.

Erilaisia päteväintitasoja tulisi käyttää määrittämään kuinka vaativaa päteväintiä kyseiselle kohteelle tarvitaan. Päteväintitaso riippuu tarkastuskohteen turvallisuusmerkityksestä. Sellaisia kohteita tarkastettaessa, joiden vauriotapauksilla on vakavia seurauksia tai joiden vauriot voivat johtaa moninkertaisiin vaurioihin, tulisi tietenkin käyttää korkeaa päteväintitasoa.

Päteväinti voidaan jakaa kahteen päteväintityyppiin: yleiseen ja erityispäteväintiin. Yleispäteväintejä käytetään pistokoemaisten tarkastusten ja sellaisten laajojen tarkastusten päteväintiin, joilla varmistetaan etteivät laitteet pääse heikkenemään odottamattomasti. Tällöin tulee ottaa huomioon odotettavissa olevat vikatyypit, sekä niiden suuntautuneisuus, sijainti, muoto, koko ja morfologia. Erityispäteväintejä käytetään lisätestauksissa, kun tiedetään millaisia vikoja on aikaisemmin löydetty tai tiedetään minkälaiselle vaurioitumismekanismille kyseinen komponentti on altis. Tarkemmasta vika-analyysistä johtuen erityispäteväinnit on helpompi osoittaa tehokkaiksi kuin yleispäteväinnit.

Päteväinnin laadun varmistamiseksi tulee

sekä yleis- että erityispäteväinnin käytännön kokeissa käyttää sellaisia koekappaleita, joiden vikojen tai vikasimulaatioiden määrä on riittävä. Riittävän luotettavuuden saavuttamiseksi tilastolliset menetelmät saattavat olla tarpeen määrittäessä vikojen tai vikasimulaatioiden määrää. Vaadittava vikojen ja vikasimulaatioiden määrä riippuu seuraavista seikoista:

- vaaditusta päteväintitasosta
- kyseisellä menetelmällä havaittavaksi ja kooltaan määritettäväksi tarkoitettujen vikojen koon vaihtelualueesta
- tarkasteltavasta vaurioitumistyyppistä ja siitä kuinka paljon säröjen suuntautuminen, sijainti, muoto, koko, kiinnipuristuneisuus ja morfologia vaihtelevat. Huomioon tulisi ottaa sekä tyypilliset että ääriarvot.

Määrittäessä vian havaitsemis- ja koonmäärittämis- ja otettava huomioon pienin havaittava vikakoko. Tämä on osa suurimmasta sallitusta vikakokoista, joka on määritelty luotettavilla lujuusanalyysillä, jotka ottavat huomioon vian eri muodot ja sallivat käytön aikaista vian kasvua. Turvallisuusmarginaalin on oltava kansallisen viranomaisen hyväksymien sääntöjen tai standardien mukainen. Tarkastusjakson aikaisen vian kasvun täytyy perustua pessimistisiin yleistietoihin tai komponenttikohtaisiin erikoistestitietoihin, joissa on otettu huomioon esimerkiksi materiaalin koostumus, lämpökäsittelyt, käyttöolosuhteet jne.

3.1.4 Päteväintimenettelyt, kriteerit ja pätevyys

Rikkomattomien tarkastusmenetelmien päteväinnin luotettavuuden takaamiseksi täytyy kaikki NDT-järjestelmän osat, kuten laitteistot, ohjelmitot, ohjeet ja henkilökunta, sisällyttää olennaisine muuttujineen päteväintiin. Henkilökunnan päteväinti voidaan tehdä erillään muista, mikäli se voidaan teknisillä perusteluilla hyväksyä, ja päteväintiprosessi on laadittu niin, että suorittavan henkilöstön kyvyt, taidot ja ominaisuudet eivät vaikuta muiden osien päteväinnin lopputulokseen. Käytännön seikat vaikuttavat siihen, että koekappaleisiin voidaan jäljentää tai simuloida vain rajallinen määrä vikoja. Tästä johtuen päteväinnin tulisi perustua tarkoituksenmukaiseen yhdistelmään käytännön koekteita ja teknisiä perusteluja.

Tapauksissa, joista on olemassa riittävästi dokumentoitua käytännön kokemusta, jolla osoitetaan menetelmä päteväksi, voidaan harkita käytännön kokeiden laajuuden pienentämistä. Poikkeustapauksissa, joissa on hyvin dokumentoitua ja validoitua käytännön kokemusta, johon sisältyy suuri määrä tarkastettujen komponenttien metallografisia tutkimuksia, enemmistä käytännön kokeista voidaan jopa luopua.

Termillä ”olennaiset muuttujat” tarkoitetaan kaikkia niitä NDT-järjestelmän, tarkastusolosuhteiden ja testattavien laitteiden muuttujia sekä siihen vikautumistilaan liittyviä muuttujia, jotka on tarkoitus havaita ja määrittää NDT-järjestelmällä ja jotka voivat vaikuttaa testauksen tulokseen ja laatuun. Kaikki olennaiset muuttujat täytyy yksilöidä jokaisessa erillisessä pätevöinnissä. Esimerkkinä NDT-järjestelmän olennaisista muuttujista ovat tarkastuslaitteiston eri osien ominaisuudet. Esimerkkejä tarkastuskohteen olennaisista muuttujista ovat kappaleen muoto, materiaalin koostumus, materiaalin rakenne ja pinnan laatu. Esimerkkejä vikojen olennaisista muuttujista ovat suuntautuminen, sijainti, muoto, koko, kiinnipuristuneisuus sekä morfologiset tekijät. Esimerkkejä tarkastusolosuhteiden olennaisista muuttujista ovat luoksepäästävyysrajoitukset ja ympäristöolosuhteet, kuten säteilyn määrä. Laitoksilla saattaa esiintyä tarkastusten aikana tai tarkastuskertojen välillä olennaisten muuttujien muutoksia, jotka saattavat vaikuttaa testauksen lopputulokseen. Tällaisten muutosten vaikutusten määrittämiseksi tulee käytännön kokeisiin sisällyttää muuttujien arvojen vaihteluaue, tai ainakin enimmäis- ja vähimmäisarvot. Niissä tapauksissa, joissa käytännön kokeiden määrää on vähennetty, tulee teknisissä perusteluissa olla olennaisten muuttujien vaihteluaueen määrittämiseksi riittävän yksityiskohtaista tietoa.

Käyttämällä koekappaleita, jotka jäljittelevät tarkastuskohdetta tai sen osaa muodoltaan, materiaalin koostumukseltaan, materiaalin rakenteeltaan, valmistusvaiheiltaan ja pinnanlaadultaan, käytännön kokeilla osoitetaan NDT-järjestelmän suorituskyky sellaisen vikautumistilan havaitsemiseen ja määrittämiseen, johon se on tarkoitettu. Yksi käytännön kokeiden tärkeimmistä asioista on koekappaleen vikojen edustavuus. Koekappaleessa olevien vikojen antaman vastineen täy-

tyy riittävästi edustaa todellisten käytössä syntyneiden tai oletettujen vikojen antamaa vastinetta NDT-menetelmällä tarkastettaessa. Teknisten perustelujen täytyy tämän takia sisältää perustelu vikojen valinnalle, jossa otetaan huomioon vikojen suuntautuneisuus, sijainti, muoto, kiinnipuristuneisuus ja morfologiset tekijät, jotta keinotekoisien tai todellisten vikojen edustavuus pystytään arvioimaan. Käytössä syntyneitä vikoja tulisi käyttää aina, kun se on mahdollista.

Sellaisilla NDT-järjestelmillä, joilla on käytännössä saatu hyviä tuloksia, tulisi osoittaa olevan terve tekninen perusta, jotta välttyttäisiin hyväksymästä menetelmää, jolla on saatu hyviä tuloksia vain sattumalta. Käytännön kokeissa on tärkeää, että ne tehdään olosuhteissa, jotka vastaavat mahdollisimman hyvin todellista tarkastustilannetta. Tähän sisältyvät ALARA-periaatteen (ALARA – As Low As Reasonably Achievable) käyttämisestä säteilyalalaisessa työssä aiheutuvat aikarajoitukset.

Teknisten perusteluiden tulee koostua hyvin dokumentoidusta aineistosta,

- joka tukee NDT-järjestelmän tai sen asianomaisten osien suorituskyvyn arviointia ja
- jossa perustellaan käytännön kokeiden laajuutta, valittuja vikoja tai vikasimulointeja ja muita päteväntikoeolosuhteita.

Tarvittava todistusaineisto voidaan johtaa aikaisemmista samanlaisista NDT-järjestelmien päteväisistä, monilaboratoriokokeista, käytännön kenttäkokemuksista, parametritutkimuksista ja muista laboratoriotutkimuksista. Matemaattis-fyysikaalista mallintamista voidaan käyttää teknisissä perusteluissa, mikäli mallin on todettu antavan yhteneviä tuloksia asianomaisten muotojen, materiaalin koostumuksen, materiaalin rakenteen sekä vikojen morfologisten tekijöiden kanssa saatujen kokeellisten tulosten kanssa ja niiden ennustuskyky, tutkittu tarkkuus ja rajoitukset ovat hyvin dokumentoituja.

Tarkastusohjeen ja laitteiston, ohjelmisto mukaanlukien, käytännön kokeet voidaan tehdä joko avoimena kokeena tai sokkotestinä turvallisuusvaatimuksista riippuen. Luotettavuuden kannalta on tärkeää, että sellaisen tarkastushenkilöstön, jonka tehtävänä on kalibroida testauslaitteita sekä kerätä ja arvioida tarkastustietoja, täydentävä pätevänti tehdään sokkotestillä, jonka perus-

teella se voi osoittaa pystyvänsä työskentelemään menestyksellisesti pätevoitetyn ohjeen mukaan. Tarkastushenkilöstön peruspätevointi voidaan tehdä standardin EN 473 [5] tai vastaavan pätevoitijärjestelmän mukaisesti. Sokkotesti on koe, jossa tarkastajalla ei ole yksityiskohtaista tietoa vikojen lukumäärästä, tyypistä, sijainnista, suuntauneisuudesta, muodosta tai koosta. Pätevoitielimen tulee valvoa käytännön kokeita, jotta voidaan varmistua siitä, että tarkastusohjetta sovelletaan oikein. Tulostietojen seuraaminen on myös välttämätöntä, jotta voidaan todeta ohjeen ja menetelmän tuottavan sellaisia tietoja, joiden perusteella vaaditut viat voidaan havaita ja määrittää oikein. Tämä on erityisen tärkeää, kun kokeita ei tehdä sokkotestinä.

Arvioitaessa NDT-järjestelmän suorituskykyä on tärkeää tarkastella sekä todellisia että valenäyttämiä. Valenäyttämä johtaa ehjän alueen arviointiin vialliseksi. Mikäli menetelmä pystyy tuottamaan hyvän havaitsemistodennäköisyyden vain tuottamalla samalla suuren määrän valenäyttämiä, osoittaa se, että kyseinen menetelmä ei joko ota tarkastusongelman fysikaalisia tekijöitä oikein huomioon tai sen erottelukyky ei ole riittävä. Tällainen tarkastusmenetelmä ei ole yhtä luotettava kuin menetelmä, joka pystyy tuottamaan saman havaitsemistodennäköisyyden pienemmällä määrällä valenäyttämiä. Hyväksyttävien valenäyttämien määrän tulisi olla tarkastuskohteesta riippuva. Suurempi valenäyttämien määrä on hyväksyttävä esimerkiksi silloin, kun on odotettavissa matala signaali-kohinasuhde.

NDT-järjestelmä katsotaan kokonaisuudessaan pätevoitettyksi, mikäli tehdyt käytännön kokeet ja tekniset perustelut vahvistavat, että kyseisen pätevoitintason mukaisesti

- kaikki vaadittavat viat havaitaan ja arvioidaan oikein,
- kaikkien vaadittavien vikojen koko määritetään riittävällä tarkkuudella.

Pätevoinnit, joissa järjestelmän kapasiteetti on arvioitu kokonaistestillä, ovat voimassa järjestelmän eri osia koskevin rajoituksin ja niin kauan kuin tarkastusohjetta ja laitteistoa käyttävä henkilöstö pysyy muuttumattomana. NDT-ohjeet ja laitteistot katsotaan erikseen pätevoitettyksi, mikäli käytännön kokeet ja tekniset perustelut kyseisen pätevoitintason mukaisesti vahvistavat,

että

- tuotetaan sellaisia tulostietoja, että kaikki vaadittavat viat havaitaan ja arvioidaan oikein,
- tuotetaan sellaisia tulostietoja, että kaikkien vaadittavien vikojen koko määritetään tarvittavalla tarkkuudella, silloin kun pätevoitetty NDT-henkilöstö soveltaa ohjeita laitteiden kalibrointiin, tietojen keruuseen ja arviointiin.

Pätevointi on voimassa niin kauan kuin

- olennaiset muuttujat ovat pätevoitetyn ohjeen toleranssien sisällä,
- pätevoitintaatimukset eivät ole muuttuneet,
- käytännön kokemukset eivät paljasta epäoimistumisia sellaisten vikojen havaitsemisessa tai määrittämisessä, joita varten pätevoitinta on tehty.

Tarkastushenkilöstö katsotaan erikseen pätevoitettyksi, mikäli sokkoteesteillä vahvistetaan, että se pystyy havaitsemaan ja määrittelemään viat pätevoitintason edellyttämällä tarkkuudella. On tarkoituksenmukaista, että henkilöstön pätevoitinta on voimassa yhtä kauan kuin standardin EN 473 mukainen peruspätevoitinta, edellyttäen, että henkilöstö työskentelee säännöllisesti sellaisten tarkastuslaitteiden ja -ohjeiden parissa, mihin se on pätevoitetty ja että se osallistuu määräajoin vuosittaisille kertauskursseille. Tarkastushenkilöstön pätevoitinta on voimassa vain sellaisille testauskokeille, jotka tehdään kyseisen tarkastusohjeen mukaan. Pätevoitintaa on mahdollista laajentaa koskemaan myös sellaisia tarkastuksia, jotka perustuvat samaan tekniikkaan ja samanlaisten laitteistojen käyttöön, mikäli voidaan osoittaa käytännössä, että tarkastajilta vaaditaan samanlaisia kykyjä, taitoja ja ominaisuuksia.

3.1.5 Asiakirjat ja todistukset

Kaikki pätevointiin liittyvät vaiheet tulee dokumentoida perusteellisesti pätevoitintaineistoon. Pätevoitintaineiston täytyy sisältää yksityiskohtaiset tiedot seuraavista asioista:

- testattavat komponentit, joille kyseinen menetelmä on pätevoitetty, sisältäen komponenttien olennaiset muuttujat sekä tarkastusolosuhteet,
- vikatyypit, joille kyseinen menetelmä on pätevoitetty, sisältäen vikojen olennaiset muuttujat,

- pätevytyksen perusvaatimukset, eli päteväintityyppi (yleinen, erityinen), päteväintitaso (vaadittu havaitsemistodennäköisyys, hyväksyttävä valehavaintojen osuus, vikakoon määritystarkkuus), aikarajoitukset ja henkilöstön päteväintivaatimukset,
- päteväintiprosessin laadunvarmistusvaatimukset,
- NDT-järjestelmän eri osat, käyttöolosuhteet, olennaiset muuttujat ja niiden vaihtelurajat, jotka voidaan hyväksyä ilman uutta päteväintä,
- päteväintiohje, joka sisältää päteväintivaatimusten toteutuksen, käytännön kokeiden laajuuden perustelut, vikojen tai vikasimulointien perustelut sekä päteväintikoeolosuhteiden perustelut,
- muut tekniset perustelut, sisältäen tukiaineistot, sekä kaikki käytännön kokeiden tulokset sisältäen yksityiskohdat päteväintikoeosuuksista, kirjatuista tiedoista ja päteväintikoeolosuhteista.

Päteväintiaineistoon tulee sisällyttää myös päteväintielimen antamat arviointiraportit ja todistukset.

Saataessa lisätietoja, tulee päteväintiaineisto päivittää. Tällaisia lisätietoja ovat esimerkiksi perustelut olennaisten muuttujien vaihtelun laajentamiselle, perustelut laitteistojen tai ohjelmiston muutoksille tai päteväintetyllä tarkastusmenetelmällä tehtyä tarkastusta seurannut rikkova aineenkoetus. Luvanhaltijan ja tarkastuspalvelujen toimittajan tulee antaa päteväintielimelle tarvittavat tiedot päteväintiaineiston ajan tasalla pitämiseksi.

Päteväintiaineiston tulee olla seuraavien organisaatioiden käytettävissä

- luvanhaltijan, jonka laitoksella menetelmää käytetään,
- viranomaisen, jonka valvonta-alueella kyseistä tarkastusmenetelmää käytetään.

Mikäli NDT-järjestelmä kykenee täyttämään sille asetetut vaatimukset, tulee päteväydestä antaa todistukset, joihin sisältyvät tiedot tarkastustyypeistä, tarkastettavista laitteista ja niiden vaurioityypeistä, joihin kyseinen NDT-menetelmä tai sen osa on päteväintetty. Todistuksiin tulee sisältyä viittaukset päteväintiaineistoon, jotta kyseisen

tarkastusmenetelmän pätevyys voidaan tarvittaessa varmistaa. Tällaiset tarkastukset tulee tehdä tiukkoja luottamuksellisuussääntöjä noudattaen, jotta sokkotesteissä käytettävien koekappaleiden vikatiedot pysyvät salassa. Päteväintitodistus tulee välittömästi peruuttaa, mikäli käytäntö osoittaa, että tarkastusmenetelmä ei kykene havaitsemaan tai määrittämään niitä vikoja, joiden tarkastukseen se on päteväintetty.

3.1.6 Päteväintiorganisaatiot ja niiden velvollisuudet

NDT-päteväinnin vastuun tulee olla kyseisen valtion lainsäädäntöjärjestelmän ja viranomaiskäytännön mukainen kaikissa Euroopan maissa. On kuitenkin olemassa joitakin samankaltaisuuksia, jotka on hyvä ottaa huomioon kahdenkeskisissä sopimuksissa, kun päteväintituloksia hyväksytään.

Kaikissa maissa täysi vastuu laitoksen turvallisuudesta on luvanhaltijalla ja sen on tehtävä kaikki mahdollinen turvallisuuden säilyttämiseksi. Luvanhaltija on näin vastuussa, että kaikki tarvittavat laitteet tarkastetaan riittävällä laajuudella vaaditun turvallisuustason säilyttämiseksi. Luvanhaltijan on

- yksilöitävä käytettävät NDT-järjestelmät, jotka voivat perustua tarkastuspalvelujen toimittajan ehdotuksiin,
- annettava välttämättömät perustiedot päteväintiä varten, esimerkiksi peruspäteväinti ja laadunvarmistus,
- määriteltävä vaadittujen NDT-järjestelmien päteväintimenettely ottamalla huomioon viranomaisvaatimukset ja
- hyväksyttävä laitoksilla käytettävien NDT-järjestelmien päteväintitulokset.

Viranomaisen tehtävänä on tarkkailla ja arvioida turvallisuutta ja sitä, että luvanhaltijat täyttävät lupaehdot. Päteväinnin yhteydessä viranomaiset joko määrittelevät tai tarkastavat päteväinnin perusvaatimukset turvallisuuden kannalta. Viranomaisen tekee tarkastuskäyntejä, valvoo määräaikaista tarkastuksia ja sitä, että luvanhaltijan toiminta on päteväintivaatimusten mukaista.

Päteväintielimellä tulee olla riittävä asiantuntemus ja riittävät tekniset voimavarat, kalusto ja organisaatio, jotka takaavat sen toiminnan laa-

dun. Pätevöntielimen tulee myös olla vapaa kaikista ydinvoimalaitoksen käyttöön liittyvistä seikoista, taloudellisista tai muista paineista, jotka voisivat vaikuttaa sen arviointikykyyn tai päätöksentekoon.

Pätevöntielin on vastuussa

- luvanhaltijoiden tai tarkastuspalveluiden toimittajien laatimien päteväntiehdotusten arvioinnista ja päteväntiohjeen hyväksymisestä,
- luvanhaltijoiden tai tarkastuspalveluiden toimittajien laatimien teknisten perusteluiden arvioinnista,
- kaikkien käytännön kokeissa tarvittavien demonstraatioiden todistamisesta sekä arvioinnista,
- päteväntiaineiston arvioinnista ja viimeistelystä, päteväntitodistusten antamisesta sekä annettujen todistusten ja loppuun vietyjen päteväntien rekisterin laatimisesta ja ylläpitämisestä,
- päteväntitodistusten peruuttamisesta väärinkäytöstapauksissa, esimerkiksi silloin, kun olennaiset muuttujat ovat vaihtelun alueen ulkopuolella, tai mikäli käytäntö osoittaa, että menetelmällä ei kyetä havaitsemaan ja määrittämään vikoja, joihin se on pätevä.

Pätevöntielimen luotettavuuden takia sen tulee täyttää eurooppalaisessa standardissa EN 45004 esitetyt tai vastaavat yleiset kriteerit. Pätevöntielimen, joka on riippumaton kolmannen osapuolen organisaatio, tulee täyttää standardissa EN 45004 A-tyyppin tarkastuslaitokselle määritellyt tai vastaavat riippumattomuuskriteerit. Pätevöntielimen, joka on luvanhaltijan organisaation riippumaton osa, tulee täyttää standardin 45004 B-tyyppin tarkastuslaitokselle määritellyt tai vastaavat riippumattomuuskriteerit.

Toisen viranomaisen valvonta-alueella päteväntetyt tarkastusmenetelmät tulee hyväksyttäväksi sekä luvanhaltijalla että kyseisen alueen viranomaisella tai heidän edustajillaan, mikäli tarkastusmenetelmää tullaan käyttämään turvallisuuden vaikuttavien komponenttien testauksessa. Pätevöinnin viranomaishyväksyntä voi perustua viranomaisten kahdenkeskisiin sopimuksiin, tai päteväntiaineistojen arviointeihin ja päteväntiorganisaation pätevyuden, voimavarojen, kaluston ja laatujärjestelmän tarkastukseen.

3.2 European Network for Inspection Qualification (ENIQ)

Ydinvoimalaitosten käytöstä Euroopassa vastaavat yritykset ovat perustaneet ENIQ:n kehittämään määräaikaistarkastuksissa käytettävien rikkomattomien tarkastusmenetelmien päteväntiä. ENIQ toimii Euroopan Unionin alaisuudessa. Näiden äänioikeutettujen jäsenten lisäksi mukana on osanottajia seuraavanlaisista organisaatioista: laitosten valmistajat, suunnittelijat, tarkastusyhtiöt sekä tutkimus- ja kehitysinstituutit. [6]

Seuraavissa kappaleissa on esitetty ENIQ:n laatiman asiakirjan näkemys päteväntin toteutamisesta sellaisena kuin se on julkaistu.

3.2.1 Päteväntiperiaatteet

Pätevänti jaetaan kahteen osaan, jotka ovat tekniset perustelut ja käytännön kokeet. Tekniset perustelut koostuvat kaikesta tarkastusmenetelmän tehokkuutta koskevasta todistusaineistosta, kuten aikaisemmista kokemuksista, laboratoriotutkimuksista, matemaattisesta mallintamisesta sekä fysikaalisella päättelyllä saaduista tiedoista. Käytännön kokeilla tarkoitetaan tarkastusmenetelyä, laitteistojen ja henkilöstön päteväntämiseksi suoritettuja kokeita tarkastuskohdetta vastaavilla koekappaleilla. Kokeet voidaan suorittaa joko sokkotestinä tai avoimina kokeina.

Teknisten perustelujen tarkoituksena on tarjota riittävästi luotettavaa aineistoa, jotta käytännön kokeiden rajallisen määrän aiheuttamat rajoitukset NDT-menetelmän toimivuuden ja vaahtavan tarkkuuden suhteen voidaan poistaa. Perustelujen tarkoituksena on myös tarjota riittävästi tietoa koekappaleiden ja käytännön kokeiden suunnittelulle sekä NDT-järjestelmän olennaisten muuttujien tunnistamiselle ja niiden sallitun vaihteluvälin määrittämiselle. Tekniseen perusteluun kuuluu kirjallinen todistusaineisto siitä, että sillä voidaan saavuttaa asetetut vaatimukset. Kirjalliseen todistusaineistoon voi kuulua koekappaleiden tarkastustuloksia, fysikaalisia päättelyä, palautetta käytännön kokemuksista, mahdollisia aikaisempia päteväntejä, monitorioriokeilla saatuja tuloksia, matemaattisia malleja, laboratoriotutkimuksia, laitteiston val-

mistajan dokumentointia sekä kokeellisen kehittämisen tuloksia.

Fysikaaliseen päättelyyn liittyvällä tutkimuksella on tarkoitus selvittää kaikki olennaiset muuttujat, joita pidetään tärkeinä tarkastusmenetelmälle asetettujen tavoitteiden kannalta. Sen avulla on myös tarkoitus selvittää kyseisen menetelmän riittävyttä tarkastuksen suorittamiseksi. Matemaattisilla malleilla voidaan arvioida erilaisissa käytännön tilanteissa saatuja tuloksia, sekä mahdollisesti laajentaa niiden käyttöaluetta. Matemaattisen mallin täytyy olla todennettu kyseisen tarkastusmenetelmän vaatimusten mukaan, ennen kuin sitä voidaan käyttää teknisissä perusteluissa. Mallin avulla voi olla mahdollista laajentaa yksinkertaisilla koekappaleilla suoritettuja koeket koskemaan varsinaisia tarkastuskohteita.

Käytännön kokeisiin voivat kuulua koekappaleet, jotka jäljittelevät kooltaan ja muodoiltaan tarkastettavaa kohdetta. Koekappaleissa olevat viat voivat myös olla tarkkoja jäljitelmiä tarkastettavassa kohteessa odotettavissa olevista vioista. Mikäli koekappaleissa on metallurgisia vikoja, tulee niiden olla samanlaisia tyyppiltään ja sijainniltaan kuin todellisessa tarkastuskohteessa. Vikojen tulisi olla vaikeimpia mahdollisia havaittavuudeltaan ja koon määrittämisen kannalta, koska tällöin saadut tulokset olisivat realistisia. Yksinkertaisempia koekappaleita voidaan käyttää, mutta silloin saadut tulokset tulee ekstrapoloida vastaamaan todellista tilannetta käyttämällä fysikaalista päättelyä ja mallintamista. Käytännön koeket voidaan tehdä joko avoimena tai sokkotestinä. On suositeltavaa, että menetelmän ja laitteiston käytännön koeket erotetaan henkilöstön testauksesta, jotta pätevöinnin mahdolliset heikkoudet olisi helpompi havaita. Tarkastusohjeen ja laitteiston käytännön koeket tulee suorittaa avoimena kokeina sekä vian havaitsemiseksi, että koon määrittämiseksi. Tämän avoimen kokeen tulokset tulee myös selittää ja perustella päteväntielimelle. Sokkotesti on realistinen tapa arvioida tarkastusohjeen, laitteiston ja henkilöstön toimivuutta yhdessä. Jotta testauksen tuloksia voidaan arvioida objektiivisesti, voidaan vikoja sisältävät koekappaleet joutua tutkimaan rikkovaa aineenkoetusta käyttämällä. Dokumentoidussa päteväntiaineistossa tulee erikseen mainita sellainen pätevänti, joka ei edellytä rikkovaa aineenkoetusta.

Pätevänti voidaan suorittaa monella eri tavalla riippuen halutusta tarkkuusasteesta sekä päteväntiin liittyvästä jo saatavilla olevan tiedon määrästä. Päteväntin taso ja tarkkuus riippuvat tietysti myös tarkastettavan laitteen turvallisuuden ja vikojen rakenteellisesta merkityksestä. Päteväntiin osallistuvien osapuolten on sovittava siitä, millä tasolla ja tarkkuudella pätevänti suoritetaan. Tarkempi päteväntimenettely, eli miten tekniset perustelut ja käytännön kokeet on yhdistetty ja millainen merkitys kummallakin on, riippuu tarkastusmenetelmältä odotettavasta tarkkuudesta ja siitä, kuinka pätevää todistusaineistoa kyseisen menetelmän kyvyistä on käytettävissä. Teknisen perustelun käyttäminen voi vähentää tarvetta käytännön arviointeihin tai jopa poistaa ne kokonaan, jos riittävä todistusaineisto tarkastusmenetelmän pätevyydestä on olemassa. Vaihtoehtoisesti käytännön kokeet voivat muodostaa koko päteväntin, mikäli riittäviä teknisiä perusteluja ei pystytä laatimaan. Päteväntiin osallistuvien osapuolten sovittua päteväntin tasosta ja tarkkuudesta, päteväntielin laatii päteväntiohjeen, jossa kuvataan tarkasti kuinka pätevänti suoritetaan käytännössä. Päteväntiohjeen tasojen ja alatasojen luokittelu on vaikeaa, koska jokaisella maalla on omat viranomaisvaatimuksensa ja lakinsa. Tästä johtuen menettely vaihtelee maittain.

3.2.2 Päteväntiasiakirjat ja päteväntin toteutus

Päteväntielin kokoaa päteväntiasiakirjat ja päteväntiin liittyvät tiedot, joihin kuuluvat ainakin seuraavat asiat:

- lähtötiedot, jotka toimitetaan ennen varsinaista päteväntiä. Lähtötietoja ovat
 - tarkastettavia komponentteja koskevat yksityiskohtaiset tiedot
 - vikatilanteet sekä havainnoitavat ja kooltaan määritettävien vikojen yksityiskohtaiset tiedot
 - tarkastusten tavoitteena oleva tulos
 - käytettävien NDT-järjestelmien yksityiskohdalliset tiedot (tarkastusohje, tarkastuslaitteisto ja tarkastushenkilöstö)
- tekninen perustelu
- päteväntimenettely, joka sisältää
 - tarkastusmenettelyn päteväntin tavoitteet

- pätevointitarkkuuden ja -tason
- teknisen perustelun ja NDT-ohjeen arviointitavan
- yksityiskohtaiset tiedot käytännön kokeiden suorituksesta, avoimet ja sokkotestit
- yksityiskohtaiset tiedot pätevöinnissä käytetyistä koekappaleista, sokkoteisteissä käytettävien vikojen yksityiskohdista osa on luotamuksellisia
- pätevointitulosten arviointitavan
- pätevointiä koskevat päätelmät, eli kaikkien arviointien ja käytännön kokeiden tulokset sekä ne olennaiset muuttujat, joiden osalta pätevointi on voimassa
- pätevointiasiakirjojen päivitys, jossa on huomioitu käytännöstä saadut tiedot.

Ennen varsinaisen pätevöinnin aloittamista on hankittava kaikki tarvittavat tiedot, joihin kuuluu

1. tarkastusmenetelmän pätevöinnin tavoitteet
2. tarkastettavien komponenttien täydellinen kuvaus
3. havainnoitavien ja kooltaan määritettävien vikojen tyyppi sekä laajuus tarkasteltavan vika-tilanteen mukaan
4. tarkastuksen tavoitteena oleva suorituskyky, havaittavien vikojen koon sekä sijainnin määrittely
5. NDT-ohjetta, laitteistoa ja henkilöstöä koskevat vaatimukset

Ennen pätevöinnin aloittamista hankittaviin tietoihin kuuluu myös tarkastettavien komponenttien tai vikojen turvallisuusmerkityksen määrittely sekä rakenteellista eheyttä koskevat päättyt. Luvanhaltija hankkii kohdissa 1–4 määritellyt tiedot ja tarkastuspalveluiden toimittaja valmistele NDT-ohjeen.

Pätevointielin laatii osapuolten tekemän pätevointitarkkuutta ja -tasoa koskevan sopimuksen mukaisen pätevointimenettelyn voimalaitoksen omistajan hyväksyttäväksi. Pätevointimenettelyssä kuvataan pätevöinnin suoritus käytännössä ja siihen kuuluvat ainakin seuraavat tiedot:

- tarkastusmenetelmän pätevöinnin tavoitteet
- pätevointitarkkuus ja -aste
- teknisen perustelun ja pätevointimenettelyn arviointitapa

- käytännön kokeiden suorittamista koskevat yksityiskohdat, avoin vai sokkotesti
- käytännön kokeissa käytettäviä koekappaleita koskevat yksityiskohdat
- pätevointitulosten arviointitapa.

Pätevointitarkkuudesta ja -tasosta riippumatta pätevointielimen tulee määritellä ja suorittaa pätevointimenettelyn seuraavat vaiheet:

- Koekappaleiden käytettävyydestä pätevointisopimuksen osana on sovittava voimalaitoksen omistajan kanssa. Mikäli harjoituskoekappaleita on käytettävissä, niitä ei tule käyttää sokkotestissä. Sen sijaan niitä voidaan käyttää NDT-menettelyn optimointiin ja niissä saatuja tuloksia teknisiin perusteluihin.
- Pätevointielin pidättää itsellään ainoastaan vaurio-olosuhteita ja koekappaleissa olevia vikoja koskevat yksityiskohtaiset tiedot, joiden julkaiseminen ei ole sokkotestin perusidean mukaista. Tiedon pidättämisestä tulisi sopia eri osapuolten kesken.
- Mikäli NDT-menettelyssä tai teknisissä perusteluissa on pätevointielimen mielestä puutteita, tulee sen antaa siitä palaute voimalaitoksen omistajalle tai tarkastuspalvelujen toimittajalle. Voimalaitoksen omistaja on vastuussa muutosten tekemisestä. Pätevointielimen tulisi määritellä käytännön kokeiden laajuus, jotta ne yhdessä teknisten perustelujen kanssa tarjoavat riittävän todistusaineiston tarkastusmenetelmän kyvystä saavuttaa asetetut tavoitteet. Joissakin tapauksissa tulee koekappaleiden hankinta aloittaa, vaikka teknisiä perusteluja ei olekaan saatu kokonaisuudessaan valmiiksi, ei kuitenkaan ennen kuin koekappaleiden suunnitteluun liittyvät tiedot ovat käytettävissä.
- Tarvittavien kokeiden ja testien tarve tulee määritellä ja koekappaleet yksilöidä. Näiden muodon, koon ja vikojen erittely tulee sisällyttää pätevointimenettelyyn. Jos sokkotestit ovat pätevöinnin tärkein osa-alue, tulee käytännön kokeiden laajuuden olla riittävä, jotta sattumanvaraisuus voidaan minimoida lopputuloksista.
- Pätevöinnin heikkojen kohtien havaitsemiseksi tulisi tarkastusohjeen ja tarkastuslaitteiston pätevointi erottaa henkilöstön pätevöinnistä.

Tarkastusohjeen ja tarkastuslaitteiston pätevänti tulisi tehdä teknisten perustelujen avulla, sekä tarvittaessa varmistaa vikojen havaitseminen ja koon määrittäminen avoimilla kokeilla. On mahdollista, että koon määrittämiseen ja vian havaitsemiseen tarvitaan erilaiset pätevänti. Avointen kokeiden tulokset tulee perustella ja selittää päteväntielimelle. Sokkotestillä voidaan arvioida menettelyn, laitteiston ja henkilöstön toimintaa yhdessä vaadittujen tulosten saavuttamiseksi.

- Päteväntielimen on eriteltävä tulosten arviointitapa päteväntimenettelyssä.
- Pätevänti aikana tuotetut raportit ja asiakirjat tulee arkistoida päteväntiasiakirjojen mukana.
- Käytännön kokeissa tulisi ottaa huomioon mahdolliset aikarajoitukset ja toimintaolosuhteet, jotka laitoksella vallitsevat todellisissa tarkastusolosuhteissa. Aikarajojen ja olosuhteiden tarkka simulointi ei ole välttämättä mahdollista eikä aina tarpeellistakaan.

Sokkotestejä suoritettaessa on edellä mainittujen seikkojen lisäksi huomioitava seuraavaa:

- Sokkotesteissä käytettävät koekappaleet tulee merkitä, kuitenkin niin, että merkinnät eivät ole nähtävissä varsinaisen pätevänti aikana. Silloin, kun koekappaleita ei käytetä päteväntiin, tulee ne säilyttää muiden kuin päteväntielimen valtuutetun henkilökunnan ulottumattomissa. Samoin kaikkien koekappaleiden valmistukseen liittyvien piirustusten sekä vikaolosuhteiden yksityiskohtaisten tietojen tulee olla vain päteväntielimen valtuutetun henkilökunnan saatavissa.
- Kaikkia sokkotestejä ja tarkastushenkilöstön kirjallisia kokeita tulee valvoa jatkuvasti. Päteväntielimen tulee valvoa, että koekappaleille suoritettavat tarkastukset tehdään päteväntitarkastusohjeen mukaan, eikä kokeissa kerättyä tietoa kuljeteta pois päteväntipaikalta missään muodossa.

Päteväntiasiakirjoissa on oltava kaikki pätevänti aikana tuotetut raportit ja tulokset. Tulosten arviointi tulee tehdä päteväntimenettelyssä määritettyjen sääntöjen mukaan. Arviointitapa voi vaihdella tilastollisesta arvioinnista päteväntielimen tekemään päätökseen.

Päätelyn tulee sisältyä päteväntiasiakirjoihin. Mikäli ainetta rikkovaa testausta on suoritettu, voidaan siitä saadut tiedot sisällyttää tuloksiin. Haluttaessa voidaan sopia luvanhaltijan ja viranomaisen kesken päteväntitulosten esittämisestä yhdessä asiakirjassa. Tämä ”Tiivistelmä teknisestä todistusaineistosta” -asiakirja sisältää todistusaineistoa kyseisen tarkastusmenetelmän suorituskyvystä ja antaa teknisiin perusteluihin ja suoritettuihin kokeisiin liittyvät viitteet. Siihen sisältyvät kaikki päteväntin keskeiset tiedot. Mikäli tiivistelmä tehdään, kootaan kaikki päteväntiasiakirjat yhteen, mutta niitä ei julkaista erikseen. Asiakirjoja voidaan käyttää esimerkiksi viranomaisten vaatimukselta.

Päteväntiasiakirjat tulee päivittää seuraavissa tapauksissa:

- samanlaisilla laitteilla suoritetuista jo päteväntitetyistä tarkastuksista saatujen tulosten perusteella
- laitoksella suoritetuista tarkastuksista saadut tulokset antavat todistusaineistoa, joka eroaa pätevänti aikana saadusta todistusaineistosta.

Osapuolten tulee sopia siitä, millaista tukea päteväntielin antaa päteväntin jälkeen.

3.2.3 Päteväntitodistukset

Todistusten tulee NDT-laitteiston ja ohjeen osalta sisältää seuraavaa:

- Päteväntielimen tulee myöntää luvanhaltijalle tai tarkastuspalvelujen toimittajalle todistus, josta selviää päteväntitetty tarkastusmenetelmä ja/tai laitteistot sekä arviointiperusteet, mikäli osapuolet pitävät sitä tarkoituksenmukaisena ja mikäli pätevänti on onnistunut.
- Tarkastusmenetelmän ja -laitteiston päteväntitodistusten tulee olla voimassa määräämättömän ajan ellei menetelmään, laitteistoon tai tarkastusohjeeseen tehdä muutoksia. Mikäli luvanhaltija haluaa muutosten jälkeen päteväntin pysyvän voimassa tai sen laajentamista, tulee sen hyväksyttävä ne päteväntielimellä. Päteväntielin voi niin harkitessaan määrätä lisää tarkastuksia edellytyksenä päteväntin muutosten hyväksymiselle. Edellä kuvat-

tua päteväntielimen hyväksyntää ei vaadita pienemmissä muutoksissa, jotka eivät tiedetävästi vaikuta tarkastuksen toteuttamiseen.

- Kun muutokset ovat tarpeellisia, jotta ohjeita koskevat päivitetty vaatimukset täyttyvät, tulee luvanhaltijan pyytää päteväntielintä tarkastelemaan muutoksen tarvetta. Muutosten aikataulu on joko luvanhaltijan tai viranomaisorganisaation päätettävissä olosuhteista riippuen.

Henkilöstön osalta todistusten tulisi sisältää seuraavat asiat:

- Henkilöstön pätevöinnin tulee olla voimassa korkeintaan viisi vuotta, kuten standardissa EN 473 on määritelty peruspätevöinnin osalta. Joissakin erityistapauksissa saattavat kysymykseen tulla myös lyhyemmät voimassaoloajat. Mikäli ajanjakson lopussa luvanhaltijalla tai tarkastuspalveluiden toimittajalla on esittää dokumentoitua aineistoa siitä, että henkilöstö on osallistunut säännöllisesti päteväntiyn tarkastukseen, tulisi päteväntielimen jatkaa todistuksen voimassaoloaikaa seuraavaksi viideksi vuodeksi tai lyhyemmäksi ajaksi. Ajanjakson lopussa vaaditaan uusi todistus.
- Kun sovellettavia ohjeita tai standardeja koskevat vaatimukset muuttuvat, tulee päivitetty vaatimukset ottaa käyttöön seuraavan uudistuksen yhteydessä.

Mikäli pätevänti on toteutettu lainsäädännöllisten vaatimusten takia, päteväntielimen myöntämät todistukset eivät tarkoita pätevöinnin hyväksymistä. Hyväksynnän antaa viranomainen, joka käyttää todistuksia todistusaineistona.

Myönnettävien todistusten muoto on standardin EN 473 mukaan päteväntiin osallistuvien osapuolten kesken sovittavissa.

3.2.4 Päteväntiin osallistuvien osapuolten vastualueet

Tässä esitetyt vastualueet pätevät ydinvoimalaitosten määräaikaistarkastuksiin. Muiden kuin ydinvoimalaitosten laitteiden tarkastuksissa tai laitteiden valmistusvaiheessa vastualueet voivat poiketa tässä esitetyistä.

Kaikissa Euroopan unionin jäsenmaissa ja

Sveitsissä on luvanhaltija vastuussa voimalaitoksen turvallisuudesta. Turvallisuutta valvotaan muiden toimenpiteiden lisäksi paineastioiden määräaikaistarkastuksilla, joita suorittavat tarkastuspalveluiden toimittajat. Luvanhaltijan vastuulla on, että tarkastusten laajuus on riittävä turvallisuuden takaamiseksi. Luvanhaltijan tulee myös toimittaa tarkastusten tulokset turvallisuutta valvovalle viranomaiselle. Luvanhaltija toimittaa aineiston päteväntiasiakirjoihin, jotka päteväntielin valmistelee. Luvanhaltijan vastuulle kuuluu:

- päättää, mitkä kohdat vaativat päteväntiä valitsemalla tarkastettava alue ja havainnoitavat viat, sekä päivittää alalla sattuneiden vauriotapausten luetteloa
- toimittaa päteväntielimelle ja tarkastuspalveluiden toimittajalle kaikki päteväntiä koskevat lähtötiedot ja määrittellä tarkastusten tavoitteet kussakin tapauksessa
- vastata viime kädessä tarkastusmenettelystä ja teknisistä perusteluista
- voida arvioida ja tehdä huomautuksia ehdotettuun päteväntimenettelyyn. Riippuen luvanhaltijan ja turvallisuutta valvovan viranomaisen suhteesta, myös luvanhaltija voi hyväksyä menettelyn
- pitää ajan tasalla päteväntielimen asiakirjat kansallisen ja kansainvälisen kokemuksen perusteella
- valvoa toimintaan vaikuttavia tarkastuksia, laitteiston hyväksymistä, henkilöstön koulutusta, menettelyjen sisältöä, toimintojen materiaalityökaluita ja tulosten arviointia.

Ohjeita laativa elin laatii päteväntimenettelystä standardin.

Viranomaisorganisaation tehtäviin kuuluu valvoa ydinvoimalaitosten turvallisuutta ja sitä, että luvanhaltija täyttää toimiluvan edellytykset. NDT-tarkastusten pätevöinnissä viranomaisorganisaation tulee joko määrittellä tai tarkastaa pätevöinnin perusedellytykset tarkoituksenmukaisuuden varmistamiseksi. Viranomaisorganisaatio tekee myös tarkastuskäyntejä ja valvoo määräaikaistarkastuksia ja sitä, että luvanhaltija täyttää pätevöinnin edellytykset.

Tarkastuspalveluiden toimittaja laatii tarkastusohjeen ja tekniset perustelut, jos luvanhaltija

näitä pyytää, sekä suorittaa tarkastuksen. Sen tulee toimittaa kaikki tarvittavat edellytykset päteväntielimelle päteväntiasiakirjojen luomista varten. Tarkastuspalvelujen toimittajan tulee pyynnöstä osallistua NDT-menetelmän päteväntiin, kun siihen sisältyvät laitteistot ja henkilöstö. Palvelujen toimittajan tulee auttaa päteväntielintä asiakirjojen päivityksessä. Palvelun toimittaja voi halutessaan esittää tarkastusmenetelmää päteväntäväksi, jolloin se voi ottaa hoidettavakseen edellä kuvattuja luvanhaltijan toimenpiteitä.

Seuraavassa luetellaan päteväntielimen vastuualueet koskien NDT-menettelyä ja henkilöstöä niissä tapauksissa, joissa luvanhaltija osallistuu päteväntiin:

- ehdotetun päteväntimenettelyn valmistelu
- tarkastusmenettelyn ja teknisten perustelujen arviointi
- päteväntimenettelyn yksityiskohtainen valmistelu
- päteväntikoekappaleiden suunnittelu ja valmistus
- päteväntikokeiden valvonta tarvittaessa
- päteväntitulosten arviointi
- päteväntiasiakirjojen tai aikaisemmin kuvattun tiivistelmän kokoaminen ja julkaiseminen
- päteväntitodistusten myöntäminen.

Mikäli pätevänti suoritetaan lainsäädännöllisten vaatimusten takia, viranomaisorganisaatio ja luvanhaltija sopivat siitä, pitääkö päteväntielimen ja luvanhaltijan olla erillisiä yksiköitä. Tapauksissa, joissa päteväntielimen on oltava riippumaton, mutta se toimii luvanhaltijan tiloissa, on sillä oltava laatujärjestelmä, joka takaa kaupallisen ja toiminnallisen riippumattomuuden.

3.3 ASME:n päteväntivaatimukset

Seuraavassa käydään läpi lyhyesti ASME XI:sta [2] esitettyjä päteväntivaatimuksia. ASME Code, Section XI Appendix VII ja Appendix VIII esittää minimivaatimukset päteväntiin. Luvanhaltijat USA:ssa ovat perustaneet yhteisorganisaation nimeltään ”Performance Demonstration Initiative” (PDI) toteuttamaan Appendix VIII:n vaatimuksia. ASME Code, Section XI:sta on esitetty yksityiskohtaiset minimivaatimukset ydinvoimalaitoskomponenttien määräaikaistarkastuksille.

3.3.1 ASME Code, Section XI:sta edellyttämä päteväntin laajuus

Appendix VII esittää vaatimukset ultraäänitarkastuksia tekevän henkilöstön päteväntiin, silloin kun se suorittaa ultraäänitarkastuksia ASME Code, Section XI:n vaatimusten mukaan. Siinä esitetään peruspätevyden lisäksi vaatimuksia tarkastajan kokemukselle, koulutukselle ja pätevyyskokeille.

Appendix VIII esittää vaatimukset ultraäänitarkastusjärjestelmän (ohje, laitteisto ja henkilöstö) päteväntiin käytännön kokeilla. Appendix I:ssä määritellyissä tarkastuskohteissa käytettävän ultraäänitarkastusmenetelmän tulee olla päteväntetty Appendix VIII:n mukaan.

Päteväntin vastuualueet on määritetty Appendix VII:ssä ja VIII:ssä sekä artikkelissa IWA-2000. Appendix VII edellyttää, että jokaisen organisaation, joka hoitaa koulutusta, kokeita tai muita päteväntin vaiheita, tulee valmistella kirjalliset ohjeet valvontaa ja hallintaa varten.

Appendix VIII edellyttää, että jokaisella luvanhaltijalla tai sen alihankkijalla tulee olla kirjallinen ohje, jolla varmistetaan vaatimusten noudattaminen. Artikkelin IWA-2000 mukaan toimivaltaisen tarkastajan täytyy vahvistaa, että kaikki tarkastukset on suoritettu päteväntetyn menetelmän mukaisesti ja IWA-2300 mukaan päteväntetyn henkilöstön toimesta. IWA-2300 viittaa Appendix VII:ään ultraäänitarkastusten osalta.

3.3.2 Henkilöstön pätevänti, Appendix VII

Liitteessä esitetään yksityiskohtaiset vaatimukset kirjalliselle käytännölle, joka päteväntinissä toimivien organisaatioiden tulee laatia. Siinä esitetään vaatimukset täydentävän koulutuksen järjestämisestä vuosittain alan kehityksestä, materiaalien vikautumistavoista ja muista työnantajan määrittelemistä asiaankuuluvista teknisistä aiheista.

Käytännön kokeet tulee suorittaa ydinvoimalaitoskomponenttien tarkastusta varten laaditun ohjeen mukaan, ja sen tulee sisältää sokkotesti koekappaleilla, jotka sisältävät IWB-3500 mukaisia simuloituja vikoja, todellisia vikoja tai molempia. Korkeintaan kolmasosassa koekappaleista tulee olla vikoja, jotka täytyy havaita.

Kirjallinen koe koostuu yleisestä ja erityisosasta. Erityisosan kysymyksistä 40–60% tulee käsitellä ASME XI:n NDT-vaatimuksia. Kaikkien kokeiden läpäisyraja on 80%. Käytännön kokeessa tulee vähintään 80% vioista havaita ja määritellä oikein, valehavaintojen osuuden ollessa korkeintaan 10%.

3.3.3. Menetelmän pätevänti, Appendix VIII

Appendix VIII:ssa on yksityiskohtaiset vaatimukset ultraäänitarkastusmenetelmän (ohje, laitteisto ja henkilöstö) pätevämmiseksi käytännön kokeilla (performance demonstration). Koko menetelmän pätevänti perustuu täysin käytännön kokeisiin, jotka tehdään sokkotestinä.

Yleiset tarkastusmenetelmän vaatimukset Appendix VIII:ssa määrittelevät vähimmäisvaatimukset siitä, mitä tietoja tarkastusohjeessa tulee olla. Siinä myös todetaan, että ultraäänitarkastajan tulee täyttää sekä Appendix VII:n perusvaatimukset että Appendix VIII:n vaatimukset.

Pätevöinnissä käytettäviä koekappaleita koskeissa vaatimuksissa määritetään niiden vähimmäismäärä, materiaali, geometria ja valmistusmenetelmä, sekä koekappaleen vikojen vähimmäismäärä, tyyppi, koko, sijainti ja suuntautuneisuus. Koekappaleiden viat eritellään säröihin ja ne edelleen tietyn tyyppisiin säröihin, keinovikoihin tai uriin, sekä tietyn tyyppisten vikojen vähimmäisosuuteen kaikista vioista. Putkistohitsien koekappaleet tulee jakaa vikoja sisältäviin ja sisältämättömiin osiin niin, että ehjiä osia täytyy olla vähintään kaksinkertainen määrä verrattuna viallisiin. Käytännön kokeiden suoritusta käsittelevissä säännöissä on kuvattu ehdot, joilla varmistetaan sokkotestissä käytettävien koekappaleiden vikojen luottamuksellisuus. Niissä määritellään myös, mitä tietoja koon määrittämisessä käytettävistä vioista tulee antaa kokelaalle.

Hyväksymisrajat sekä havaitsemiselle että koon määrittämiselle perustuvat tilastolliseen tarkasteluun ja edellyttävät testitulosten tilastollista arviointia. Menetelmä katsotaan päteväntiksi, mikäli se täyttää hyväksymiskriteerit, ja pätevänti on voimassa niin kauan kuin olennaiset muuttujat ovat sallituissa rajoissa.

3.4 ASME vs NRWG

Seuraavassa käydään läpi ASME:n mukaisen ja eurooppalaisen päteväntitavan suurimpia eroavaisuuksia. Perusnäkemyksellinen ero syntyy jo vaatimusten erilaisesta tarkoituksesta. ASME:n tarkoituksena on antaa selkeä menettelytapa, jolla pätevänti toteutetaan, kun taas NRWG:n ja eurooppalaisen tavan mukaan annetaan suunta-aviivat, joiden puitteissa pätevänti suoritetaan otamalla huomioon eri maiden erilaiset tarpeet ja kansalliset lait. [2, 4]

ASME Code, Section XI määrittelee ne komponentit ja hitsit, jotka tulee tarkastaa appendix VIII:n mukaan päteväntitetyllä ultraäänitarkastusmenetelmällä. Näissä päteväntivaatimuksissa on esitetty yleiset säännöt ja yksityiskohtaiset vaatimukset, jotka koskevat vain yhdeksää tarkoin määritettyä tarkastuskohdetta. Eurooppalaisessa tavassa ei ole erikseen määritetty, mitkä komponentit tulee tarkastaa päteväntitetyllä menetelmällä, vaan siinä on otettu huomioon päteväntivaatimusten riippuvuus tarkastuskohteen turvallisuusmerkityksestä. Se ei myöskään rajoitu pelkästään ultraäänitarkastuksiin. NRWG:n dokumentissa on esitelty käsite päteväntitaso, joka tarkoittaa sitä, että päteväntin vaatimustaso riippuu tarkastuskohteen turvallisuusmerkityksestä niin, että tärkeimpien komponenttien kohdalla päteväntin taso on korkein.

Yhteistä molemmille päteväntitavoille on niiden perustuminen käytännön kokeille. ASME:n pätevänti perustuu pelkästään käytännön kokeille, kun taas eurooppalaiseen tapaan kuuluvat olennaisena osana tekniset perustelut. Teknisillä perusteluilla pystytään varmistamaan, että kaikki olennaiset muuttujat on otettu huomioon. Niissä määritellään myös käytännön kokeissa käytetyt viat, jotta käytännön kokeiden rajallisesta määrästä johtuvat rajoitukset eivät mitätöisi päteväntiä. Käytännön kokeiden sokkotestinä suorittamisen tärkeys on otettu huomioon molemmissa tavoissa. ASME:n tavassa tämä on selvä vaatimus, kun taas eurooppalaisessa tavassa painotetaan sen merkitystä henkilöstön päteväntinissä. Merkittävä ero on eurooppalaisen tavan mahdollisuus tehdä henkilöstön pätevänti erillään ohjeen ja laitteiston päteväntinistä.

Appendix VIII määrittelee tietyssä laajuudessa jokaiselle tarkastuskohteelle päteväintikoekappaleissa käytettävien vikojen tyyppin, koon, sijainnin ja suuntautuneisuuden. Eurooppalaisessa tavassa painotetaan koekappaleissa käytettävien vikojen merkitystä päteväinnissä. Siinä tulee ottaa huomioon tarkastuskohteessa vaikuttavan vikautumismekanismien merkitys odotettavissa olevien vikojen ominaisuuksiin. Havaittavien vikojen koon arvoissa tulee ottaa huomioon lujuusopilliset arviot rakenteissa sallittavien vikojen koosta.

Havaittujen vikojen ja valehavaintojen hyväksymiskriteerit perustuvat ASME:ssä tilastollisiin menetelmiin. Tällaisen järjestelmän tarkoitus ei ole määrittää tarkastusmenetelmän varsinaista suorituskykyä, vaan lähinnä erotella hyvät ja huonot tarkastusmenetelmät toisistaan. NRWG:n näkemyksen mukaan hyväksymiskriteerit ovat tapauskohtaisia, ja riippuvat näin ollen tarkastuskohteen turvallisuusmerkityksestä. Ne määritetään ja dokumentoidaan teknisissä perusteluissa.

Päteväinnin dokumentoinnista on sekä NRWG:n että ENIQ:n raportissa annettu selvät ohjeet, jotka kattavat kaikki päteväinnin vaiheet. Niissä on myös määritetty kustakin vaiheesta vastuussa olevat organisaatiot tai elimet. ASME

Code, Section XI Appendix VIII määrittelee myös päteväinnistä tehtävän dokumentoinnin, mutta se on selvästi suppeampi kuin NRWG:n tai ENIQ:n vaatimukset. Yksi merkittävä ero eurooppalaisen tavan ja ASME:n välillä on, että ASME ei vaadi päteväintiasiakirjojen päivittämistä kentältä saadun palautteen mukaan.

NRWG:n ja ENIQ:n raporteissa määritellään luvanhaltijan, viranomaisen ja päteväintielimen roolit ja vastualueet siinä määrin kuin se on mahdollista yleisluontoisessa raportissa. ASME:n määrittelemät vastuut käytiin läpi edellä, mutta se ei määrittele yksityiskohtaisemmin, kuinka käytännön kokeet tulee hoitaa, ja kuka vastaa mistäkin vaiheesta. Suurimpana erona organisaatiotasolla on, että eurooppalainen tapa edellyttää päteväintielimen perustamista. Päteväintielimen tulee olla vapaa kaikista ydinvoimalaitoksen käyttöön, taloudellisiin tai muihin seikkoihin liittyvistä päätöksistä, jotka saattavat vaikuttaa sen tekemisiin arviointeihin ja päätöksiin. Tällaisessa päteväintielimessä tulee olla usean eri alan asiantuntijoita, jotta se kykenee hoitamaan sille asetetut tehtävät. Tämä saattaa osoittautua ongelmalliseksi pienille maille, joilla on rajallinen määrä asiantuntijoita.

4 PÄTEVÖINNIN SUORITTAMINEN

Pätevöinti eurooppalaisen tavan mukaan tulee käytännössä tehdä kahdessa eri vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa hankitaan kaikki tarvittavat lähtötiedot. Toisessa vaiheessa tehdään varsinainen pätevöinti. Jotta pätevöinti täyttää sille asetetut vaatimukset, tulee ennen varsinaista käytännön työtä selvittää pätevitettävän tarkastuksen kohteen turvallisuusmerkitys ja tätä kautta päteviöityksen taso. Tarkastuskohteen mukaan määräytyvät ne viat, jotka tarkastuksella tulee havaita. Nämä taas määräävät käytettävän tarkastusmenetelmän, joten myös vikoihin liittyvät muuttujat tulee selvittää, ennen kuin voidaan ryhtyä valmistelemaan teknisiä perusteluja. Ennen päteviöinnin aloittamista tulee myös esittää vaatimukset, jotka tarkastuksen pitää täyttää.

Edellä mainittujen toimenpiteiden jälkeen voidaan siirtyä varsinaiseen päteviöintiin. Päteviöinnin aikana voidaan joitakin vaiheita suorittaa samanaikaisesti, mutta osa toimenpiteistä voidaan aloittaa vasta, kun edeltävä vaihe on saatettu loppuun. Esimerkkinä voidaan mainita tarkastusohjeen ja -laitteiston päteviöittämisiksi suoritettavat kokeet, jotka tulee olla suoritettuina ennen kuin kyseistä laitteistoa käyttävän henkilöstön päteviöittämisiksi vaadittavia käytännön kohteita voidaan aloittaa.

Seuraavassa on ENIQ:n [6] näkemys päteviöinnin toteuttamisesta. Toimenpiteet on esitetty ai-

kajärjestyksessä ja niiden suorittaminen kuuluu kyseisestä asiasta vastaavalle elimelle päteviöintiorganisaatiossa, joita on käsitelty kappaleissa 3.1 ja 3.2. Ennen varsinaisen päteviöinnin aloittamista tulee suorittaa seuraavat vaiheet:

- hankkia kaikki tarvittavat tiedot koskien tarkastettavaa kohdetta, vikoja ja tarkastuksen sekä päteviöinnin tavoitteita
- optimoida NDT-ohje käyttämällä tyypillisiä vertailu- ja harjoittelukappaleita.

Päteviöinnin aikana suoritetaan seuraavat vaiheet esitetyssä järjestyksessä:

- NDT-ohjeen ja teknisten perustelujen valmistelu
- esitetyn NDT-ohjeen ja teknisten perustelujen arviointi
- päteviöintiohjeen ehdottaminen mukaan lukien avoimet ja sokkotestit, kuten on edellytetty
- päteviöintiohjeen hyväksyminen/hylkäys
- tarkastusohjeen ja -laitteiston päteviöinti
- päteviöintitodistuksen myöntäminen/evääminen tarkastusohjeelle/laitteistolle
- henkilöstön päteviöinti käyttäen päteviöitettyä tarkastusohjetta/laitteistoa
- päteviöintitodistuksen myöntäminen/evääminen henkilöstölle
- päteviöintiasiakirjojen kokoaminen ja viimeistely
- päteviöinnin hyväksyntä.

5 TEKNISET PERUSTELUT

Ydinvoimalaitosten määräaikaistarkastuksissa käytettävien tarkastusmenetelmien pätevänti eurooppalaisen käytännön mukaan jakaantuu kahteen osaan, käytännön kokeisiin ja teknisiin perusteluihin. Käytännön kokeilla osoitetaan koko järjestelmän toimivuus sille tarkoitettun tehtävän suorittamisessa. Saatuun tulokseen vaikuttaa kuitenkin suuri määrä erilaisia muuttujia, minkä takia sitä ei voida pitää kaikkia tarkastustilanteita kattavana. Toinen ongelma on saatujen tulosten luotettavuus. Jotta pystytään osoittamaan, että saadut tulokset eivät ole sattumaa, tarvitaan suuri määrä kokeita samanlaisilla vioilla. Esimerkkinä voidaan todeta, että vikojen havaitsemiseksi 95% varmuudella, niin että luotettavuus on 95%, täytyy löytää 59 vikaa 59:stä. Tällöin on kaikkien vikojen oltava samanlaisia ominaisuuksiltaan, eli on todistettu, että tämän tyyppinen vika löydetään edellä mainituilla varmuuksilla. Ottamalla huomioon vikoihin liittyvät muuttujat, tulisi käytännön kokeiden määrästä äärettömän suuri, mikäli pätevänti tehtäisiin pelkästään käytännön kokeilla. Edellä mainitut ongelmat ovat johtaneet siihen, että päteväntiin tulee kuulua myös tekniset perustelut. Niiden tarkoitus on täydentää käytännön kokeita ja pyrkiä osoittamaan, että tietyssä tarkastuksessa saatuja tuloksia vastaavat tulokset voidaan saavuttaa kaikissa käytännössä vastaan tulevilla tarkastustilanteissa.

5.1 Teknisten perustelujen määrittely

Tekniset perustelut on määritelty NRWG:n dokumentissa ”Common position of European regulators on qualification of NDT systems for pre- and in-service inspection of light water reactor components” seuraavasti: ”dokumentoitu todistusaineisto, joka tukee koko NDT-järjestelmän tai sen osan suorituskyvyn arviointia, sekä todistusaineisto, joka perustelee käytännön kokeiden laajuutta, valittuja vikoja tai vikasimulointeja ja muita päteväntikoe-edellytyksiä”. [4]

ENIQ on määritellyt tekniset perustelut päteväntiä koskevassa dokumentissaan ”European Methodology for Inspection Qualification” seuraavasti: ”Kaikki tietyn komponentin tarkastukseen käytetyn NDT-tekniikan luotettavuutta koskevat tiedot. Teknisten perustelujen tarkoitus on

1. Parantaa tarkastuksen luotettavuutta ylittämällä rajoitetun koekappalemäärän aiheuttamat rajoitukset kokoamalla kaikki todisteet, jotka tukevat NDT-systeemin suorituskyvyn arviointia vaadittavan tason saavuttamisessa
2. täydentää ja yleistää käytännön kokeiden tulokset osoittamalla, että koekappaleissa käytetyillä vioilla saadut tulokset olisi yhtä hyvin saatu myös millä tahansa muilla mahdollisilla vioilla

3. tuottaa tekninen perusta tehokkaiden käytännön kokeiden suunnittelulle
4. tuottaa tekninen perusta NDT-systeemin olennaisien muuttujien ja niiden vaihteluvälin valinnalle.”

Teknisiin perusteluihin voi kuulua fysikaalista päättelyä, matemaattista mallinnusta, tuloksia monilaboratoriokokeista, käytännön NDT tuloksia tai laboratoriotutkimuksia soveltuvien osien. NDT-järjestelmän ENIQ on määritellyt seuraavasti: kaikki ainetta rikkomattoman testauksen osat mukaan lukien laitteisto, tarkastusohje ja henkilöstö, jotka voivat vaikuttaa tarkastuksen lopputulokseen ja laatuun. [6]

5.2 Teknisten perustelujen tarkoitus

5.2.1 Koekappaleiden ja vikojen tekniset perustelut

Tarkastuskohteen materiaali ja odotettavissa olevat viat määräävät sen, mitä tarkastusmenetelmää tulee käyttää. Tästä johtuen täytyy jo löydettyistä ja odotettavissa olevista vioista tehdä analyysi, jossa määritellään kaikki olennaiset muuttujat. Tämä tulee tehdä ennen teknisiä perusteluita, jotta pätevänti ei käytetä liian helppoja vikoja ja näin mitätöidä koko päteväntiä.

Koekappaleita ja vikoja koskevassa teknisessä perustelussa pyritään osoittamaan, että ne vastaavat todellista tarkastuskohdetta mahdollisimman hyvin. Koekappaleiden osalta tulevat kysymykseen materiaalin ominaisuudet, valmistusprosessi ja sen vaikutus materiaaliominaisuuksiin sekä mahdolliset korjaukset, joita tarkastuskohteelle on tehty käytön aikana ja niiden vaikutus materiaaliominaisuuksiin. Tässä tulee myös selvittää koekappaleissa käytettyjen vikojen sekä todellisesta tarkastuskohteesta löydettyjen ja odotettavissa olevien vikojen vastaavuus. Sellaisten koekappaleiden käyttö, jotka eivät ole geometrialtaan tarkkoja kopioita tarkastuskohteesta, tulee perustella näissä teknisissä perusteluissa.

5.2.2. Tarkastusohjeen tekniset perustelut

Tarkastusohjeen teknisissä perusteluissa tulee esittää todisteet siitä, että tarkastusohje pystyy täyttämään sille asetetut vaatimukset vian löytämisen ja/tai koon määrittämisen suhteen. Tähän voidaan käyttää esimerkiksi fysikaalista päätteilyä, matemaattista mallintamista, monilaboratoriokokeiden tuloksia sekä parametritutkimuksia. Tässä tulee määrittellä myös tarkastusohjeen olennaiset muuttujat. Niin ikään voidaan myös määrittellä tarkastuksen kannalta hankalin mahdollinen vika, jota koekappaleissa käyttämällä testataan tarkastusmenetelmän todellinen kyky täyttää sille asetetut vaatimukset. Pätevöintimenettelystä riippuen edellinen voi kuulua myös koekappaleiden ja vikojen teknisiin perusteluihin.

5.2.3 Tarkastuslaitteiden tekniset perustelut

Tarkastuslaitteiden tekniset perustelut on tarkoitettu täydentämään tarkastusohjeen teknisiä perusteluja. Siinä tulee esittää todisteet siitä, että tarkastuslaitteisto mukaan lukien manipulaattori sekä tiedon keräys- ja käsittelyjärjestelmä ovat kykeneviä täyttämään tarkastusohjeen niille asetamat vaatimukset. Siinä tulee myös määrittää laitteiston olennaiset muuttujat ja niiden sallittu vaihteluväli, jotta jokin laitteiston osa voidaan tarpeen vaatiessa korvata toisella tai pystytään määrittelemään uudelleen tehtävän pätevöinnin laajuus.

5.3 Teknisten perustelujen rakenne

Teknisille perusteluille on määritelty SKI:n raportissa 97:11 yleinen rakenne tai jäsenitys, joka perustuu kolmeen selkeään kohtaan:

1. Olennaisten muuttujien tunnistaminen, jotka NRW taas määrittelee seuraavasti: ”Kaikki ne NDT-järjestelmän, tarkastusolosuhteiden, tarkastuskohteen ja odotettavissa olevien vikojen muuttujat, jotka voivat vaikuttaa tarkastuksen lopputulokseen ja laatuun”.
2. Teknisen ratkaisun valinta ja perustelut.
3. Käytännön kokeiden laajuuden perustelu.

Tätä yleistä rakennetta voidaan soveltaa kolmeen edellä mainittuun erityyppiseen tekniseen perusteluun. [7]

ENIQ Task group 2.3 on esittänyt yksityiskohteisemmän rakenteen teknisille perusteluille, liite 1. [8]

5.4 Olennaiset muuttujat

ENIQ on jakanut tarkastuksen lopputulokseen ja laatuun vaikuttavat muuttujat kahteen osaan: muuttuvat parametrit ja olennaiset parametrit. ENIQ:n ja NRW:n näkemykset eroavat siinä mielessä toisistaan, että NRW pitää kaikkia niitä muuttujia, jotka voivat vaikuttaa tarkastuksen lopputulokseen ja laatuun olennaisina muuttujina, kun taas ENIQ on jakanut ne kahteen edellä mainittuun osaan. Jako perustuu siihen, että osa vaikuttavista parametreista voi vaihdella tietyissä rajoissa vaikuttamatta tarkastuksen lopputulokseen, kun taas osa parametreista vaikuttaa heti muuttuessaan tarkastuksen lopputulokseen. [6]

Kattava lista olennaisista muuttujista voidaan määrittellä vasta, kun tiedetään tarkastuskohde ja käytetty menetelmä. Joitakin yleisiä koekappaleita, vikoja ja tarkastusmenetelmää koskevia muuttujia on esitetty seuraavissa kappaleissa. Niissä käsitellään kaikkia tarkastuksen laatuun ja lopputulokseen vaikuttavia muuttujia olennaisina muuttujina NRW:n esittämän tavan mukaisesti.

5.4.1 Koekappaleiden ja vikojen olennaiset muuttujat

Koekappaleen olennaisia muuttujia ovat

- geometria
- materiaali
- valmistustapa
- pinnan laatu
- hitsin rakenne.

Vikojen olennaisia muuttujia ovat

- vikatyyppejä
- sijainti paksuussuunnassa
- sijainti pinnansuunnassa
- muoto
- koko
- suuntautuneisuuden vaihtelualue
- avauma
- särön pinnankarheus
- särön kärjen säde.

Voimalaitoksilla löydettyjä tavallisimpia vikatyyppejä ovat mekaanisen väsymisen säröt, termisen väsymisen säröt, korroosioväsymyssäröt, jännityskorroosiosäröt (IGSCC, TGSCC) sekä erilaiset hitsausviat.

Särön muoto voidaan luokitella esimerkiksi seuraaviin tapauksiin: suora, mutkitteleva, taipunut ja haarautunut, joka voidaan vielä tarpeen vaatiessa erotella runsaasti haarautuneeksi tai haarautuneeksi. Samoja määritelmiä voidaan käyttää särön muodosta sekä pinnan suunnassa että paksuussuunnassa. [12]

Suurin sallittu vikakoko, sekä syvyyden että pituuden suhteen, saadaan lujustarkasteluista, joissa on otettava huomioon tarkastusten välillä tapahtuva särönkasvu ja se, että NDT-menettimillä särön koko voidaan arvioida liian pieneksi todelliseen verrattuna. [9]

Säröjen suuntautuneisuutta voidaan arvioida komponentissa vaikuttavien jännitysten perusteella sekä aikaisemmin havaittujen vikojen pohjalta. Näiden tietojen perusteella tulee määritellä suuntautuneisuudelle vaihtelualue. Määritettäessä vaihtelualuetta aikaisemmin löydettyjen vikojen pohjalta tulee ottaa huomioon, että kaikki mahdolliset arvot eivät todennäköisesti ole esiintyneet, koska löydettyjen vikojen lukumäärä ei ole suuri.

Särön avaamalla on suuri merkitys särön havaittavuuteen ja koon määrittämiseen. Ultraäänitarkastuksessa säröstä saatava kaiku voi pienentyä huomattavasti, jos särön pinnat ovat hyvin lähellä toisiaan. Mikäli särö sijaitsee puristusjännityksen alaisella alueella, voivat särön pinnat puristua niin lähelle toisiaan, että siitä saatava kaiku on liian pieni särön havaitsemiseksi. Tämä on mahdollista sellaisten särötyyppien kohdalla, joiden pinnat ovat tavallisesti lähellä toisiaan, eikä särön sisällä ole tapahtunut oksidoitumista tai muuta korroosiota, joka olisi tuottanut särön sisälle korroosiotuotteita tai kasvattanut särön leveyttä. [7]

5.4.2 Tarkastusohjeen olennaiset muuttujat

Tarkastusohjeen olennaiset muuttujat riippuvat siitä, mitä menetelmää ja tekniikkaa käytetään. Esimerkkinä on käytetty ultraäänitarkastusta. [7, 10]

Ultraäänitarkastusohjeen olennaisia muuttujia ovat

- aaltomuoto
- luotaimen tyyppi ja koko
- taajuus
- kulma
- pulssin pituus
- luotausherkkkyys
- kirjausherkkkyys
- skannauksen askel (mekanisoiu)
- skannauksen nopeus
- koon määrittämenetelmä.

5.4.3 Tarkastuslaitteiston olennaiset muuttujat

Tarkastuslaitteistoon liittyvät olennaiset muuttujat ovat laitteistokohtaisia, mistä johtuen mitään kattavaa listaa kaikista muuttujista ei voida tehdä ennen kuin tiedetään kyseinen laitteisto. Esimerkkinä on esitetty joitakin ultraäänilaitteistoon liittyviä olennaisia muuttujia. Ultraäänitestauksessa käytettävä laitteisto voidaan jakaa seuraaviin osiin: ultraäänilaitteisto, kaapeli, luotain ja mekanioidussa testauksessa manipulaattori. [10, 11]

Ultraäänilaitteen olennaisia muuttujia ovat

- näytön pystyasteikon lineaarisuus
- näytön vaakasteikon lineaarisuus

- digitaalikoodaimen erottelukyky
- näytteenottotaajuus
- A-kuvan tarkkuus
- ultraäänipulssin amplitudi
- ultraäänipulssin leveys
- ultraäänipulssin laskuaika
- ultraäänipulssin nousuaika
- vastaanottimen kaistanleveys
- vastaanottimesta saatava vahvistus
- vastaanottimen kaistanpäästösuodin
- näytteenottoportti.

Kaapelin olennaisia muuttujia ovat

- pituus
- impedanssi.

Luotaimen ominaisuudet voidaan jakaa kolmeen osaan: sähköiset ominaisuudet, äänikentän ominaisuudet sekä luotaimen erotuskyky. Näin saadaan olennaisiksi muuttujiksi

- taajuusvaste l. keskitaajuus ja kaistanleveys
- pulssin pituus ja amplitudi
- signaalikohinasuhde
- herkkyys
- suuntakulma/sivuttaiskulma
- luotaimen virhekulma
- painejakauma/lähikentän pituus
- lähetinvastaanotinluotaimen herkkyysalue
- fokusoidun luotaimen fokusetäisyys, fokusalueen pituus ja fokusalueen halkaisija
- kaksoisluotaimen fokusointitapa
- aksiaalinen erotuskyky
- lateraalinen erotuskyky.

ASME XI Appendix VIII mukaan taajuusrajat määritetään -6dB pudotuksella ja keskitaajuus

aritmeettisena keskiarvona. Pulssin pituus ja amplitudi voidaan määrittää pulssin aikaesityksestä. Luotaimen signaalikohinasuhde määritellään luotaimelta palaavan kaikupulssin huippujännitteen ja kohinan huippujännitteen suhteena. Luotaimen herkkyys saadaan luotaimelle lähetetyn pulssin huippujännitteen ja 100 mm:n kaareltapa palaavan kaikupulssin huippujännitteen suhteena desibeleissä. Tähän tarvitaan vertailukappale 100 mm kaarella. Suunta- ja sivuttaiskulmien määrittystä varten mitataan äänikeilan poikkeileikkauksista -6dB:n akselit. Painejakauma voidaan määrittää mittaamalla maksimikaikukorkeus kaikista eri syvyydellä olevista rei'istä, jotka antavat selkeän kaiun tai selvittämällä lähikentän pituus. Äänikentän mittauksissa oli käytetty koekappaletta, jonka yksi seinämä oli 35° kulmassa sivuihin verrattuna. Tähän vinoon seinämään oli porattu reikiä eri kohtiin, jolloin niiden etäisyys vastapäisistä seinämistä oli erilainen. Lähetinvastaanotinluotaimen herkkyysalueesta mitataan maksimipiste ja -6dB:n pisteet. Fokusoidun luotaimen fokusetäisyys on etäisyys luotaimen pinnasta äänikentän maksimikaikukohtaan. Aksiaalinen erotuskyky määritellään niiden kahden heijastajan välisenä etäisyytenä, joiden antamien kaikujen väliin jää -6dB:n pudotus. Lateraalinen erotuskyky määritellään niiden kahden samalla etäisyydellä olevan heijastajan väliseksi etäisyydeksi, joiden välissä kaikukorkeus putoaa puoleen. [11]

Manipulaattorin olennaisia muuttujia ovat

- skannerin lineaarisuus
- liikeratojen toistettavuus
- erottelutarkkuus.

6 KÄYTÄNNÖN KOKEET

Eurooppalaisessa päteväntimenettelyssä käytännön kokeilla osoitetaan, että teknisissä perusteissa määritellyllä tarkastuslaitteistolla ja -ohjeella saavutetaan vaadittu suorituskyky. Myös henkilöstön pätevänti tehdään käytännön kokeilla käyttämällä jo pätevoidettyä tarkastuslaitteistoa ja -ohjetta.

Käytännön kokeet voidaan suorittaa joko avoimena kokeena tai sokkotestinä. Avoimessa kokeessa tarkastaja tietää, minkä tyyppisiä vikoja koekappaleet sisältävät. Tarkastajalla voi olla myös yksityiskohtaisempia tietoja vioista, mutta ei kuitenkaan niin tarkkoja tietoja, että niiden avulla hänen on mahdollista tulkita tarkastustulokset tilanteeseen sopivaksi katsomallaan tavalla. Sokkotestissä tarkastajalla ei saa olla minkäänlaisia tietoja koekappaleesta olevista vioista eikä niiden lukumäärästä.

Mikäli pätevoidintejä tullaan suorittamaan sekä avoimilla kokeilla että sokkotesteillä, tulee ottaa huomioon se, että koekappaleissa olevien vikojen yksityiskohtien tulee pysyä salaisina. Jotta sokkotestissä käytettävien koekappaleiden vikojen yksityiskohtaiset tiedot eivät leviä yleiseen tietoon, ei sokkotesteissä ja avoimissa kokeissa voida käyttää samoja koekappaleita. Koekappaleita tulee olla joko riittävä määrä tarvittavan vaihtelun saavuttamiseksi tai sitten tulee varmistaa muulla tavalla, että tieto ei leviä myöskään epäonnistuneiden sokkotestien avulla, koska silloin voidaan kerran arvioitujen tulosten perusteella päätellä minkälaisia vikoja koekappaleet eivät sisällä. Sokkotestissä käytettävien koekappaleiden tunnistetiedot tulee merkitä niin, että ne eivät ole tarkastajan havaittavissa.

Suomen vähäisestä laitosmäärästä johtuen on tarvittavien pätevoidintikoekappaleiden määrä melko pieni. Tämä aiheuttaa sen, että koekappaleissa olevien vikojen tiedot leviävät ennen pitkää tarkastajien keskuudessa. Tästä syystä on sokkotes-

tissä käytettävien koekappaleiden käyttöikä rajoitettu, vaikka niissä olevia vikoja ei testin jälkeen tarkastettaisikaan rikkovalla aineenkoetuksella.

6.1 Tarkastusmenettelyn pätevoidinti

Tarkastusmenettelyn pätevoidinnillä tarkoitetaan tarkastuslaitteiston ja -ohjeen pätevoidintiä. Pätevoidinnin osana suoritettavat käytännön kokeet voidaan tehdä joko avoimena kokeena tai sokkotestinä.

Tarkastuslaitteiden pätevoidinti

Tarkastuslaitteistoa pätevoidittäessä varmistetaan käytännön kokeilla, että teknisissä perusteissa määritellyllä laitteistolla saavutetaan vaadittu suorituskyky vikojen havaitsemisessa ja/tai määrittelyssä.

Tarkastusohjeen pätevoidinti

Tarkastusohjeen pätevoidinnissä käytännön kokeilla varmistetaan, että toimimalla teknisissä perusteissa määritellyn tarkastusohjeen mukaan on mahdollista löytää viat ja tarvittaessa määrittellä ne vaaditulla tarkkuudella.

6.2 Tarkastajien pätevoidinti

Tarkastushenkilöstön pätevoidinnillä varmistetaan, että tarkastaja löytää ja tarvittaessa pystyy määrittämään halutut viat vaaditulla tarkkuudella käyttämällä kyseistä tarkastuslaitteistoa ja -ohjetta.

Sokkotestit

Henkilöstön pätevoidinti tulee suorittaa sokkotestillä. Kokeiden aikana valvojan tulee valvoa, että tarkastus suoritetaan tarkastusohjeen mu-

kaisesti ja mahdollisten rajoitusten puitteissa. Mahdollisia rajoituksia ovat esimerkiksi todellisen tarkastuskohteen säteily määrän takia asetettu aikarajoitus, sekä tarkastuskohteen mahdollisesti rajoitettu luoksepäästävyys ja tarkastuskoh-

teen geometrian asettamat rajoitukset. Kokeen päätyttyä tulee varmistua, että tarkastaja ei vie mukanaan tietoa koekappaleiden vioista, esimerkiksi ultraäänilaitteen muistissa.

7 KOEKAPPALEIDEN VALMISTUS

Eurooppalaisen päteväintitavan mukaan käytännön kokeissa käytettyjen koekappaleiden tulisi mitoiltaan (halkaisija, seinämänpaksuus) vastata todellisia tarkastuskohteita. Koekappaleiden muiden ominaisuuksien, kuten materiaalin, muodon, pinnanlaadun, valmistustavan ja hitsien sijainnin, tulee myös vastata todellisia tarkastuskohteita. Koekappaleissa olevien vikojen tulee olla tyypiltään, muodoltaan, kooltaan, sijainniltaan, suuntautuneisuudeltaan ja avautumaltaan niin lähellä aitoja vikoja, että niiden tarkastuksessa antama näyttämä on samanlainen kuin todellisista vioista saatava.

Tarkastuskohdetta jäljittelevien koekappaleiden yksityiskohtaiset tiedot ovat tapauskohtaisia ja ne on saatavissa laitoksen dokumentaatiosta, minkä takia niitä tietoja ei selvitetä tämän työn yhteydessä. Päteväintikoekappaleissa käytettävien vikojen ominaisuuksilla on tärkeä merkitys koko päteväintä ajatellen. Tästä johtuen on tässä työssä tutkittu käytössä syntyneiden vikojen yksityiskohtaisia ominaisuuksia kirjallisuudesta löydettyjen tietojen perusteella.

7.1 Vikatyypit

Tässä työssä tarkasteltuja sekä voimalaitoskäytössä löydettyjä ja odotettavissa olevia vikatyyppejä ovat mekaanisen väsymisen aiheuttamat säröt, termisen väsymisen aiheuttamat säröt, korrosioväsymisen aiheuttamat säröt, erilaiset jännityskorrosiosäröt sekä erilaiset hitsausviat. Seuraavassa on esitetty säröjen eri ominaisuuksia, kuten särön morfologia, suuntautuneisuus, muoto ja haarautuneisuus. Muita tarkastettavuuteen vaikuttavia tietoja kuten kärjen morfologia, särön leveys ja pinnan karheus on myös esitetty. Särön kärkeä on arvioitu kärjen säteen perusteella. Säröjen yksityiskohtaiset tiedot perustuvat lähteessä [12] esitettyihin tuloksiin, jotka ovat peräisin käytössä syntyneiden vaurioiden tutkimusraporteista. Tämä tekee vertailupohjan yksipuoliseksi, mutta tietooni ei tullut muita vastaavia raportteja. Lähteessä [12] säröjen leveyksien arvoja oli verrattu muissa tutkimuksissa esitettyihin arvoihin ja todettu niiden olevan vastaavia.

7.1.1 Mekaaninen väsyminen

Mekaanisessa väsymisessä särön kasvua kontrolloivat vaihtelevat ulkoiset kuormat. Lämpökuormilla ja korroosiolla ei ole mekaanisessa väsymisessä merkittävää roolia särön ydintymis- eikä kasvuvaiheessa. Säröt muodostuvat yleensä kohtisuoraan pääjännitystasoa vastaan. Suuntautuneisuus aineen paksuussuunnassa on yleensä kohtisuorassa pintaa vastaan, mutta kappaleessa vaikuttavat esimerkiksi hitsauksesta johtuvat jäännösjännitykset saattavat aiheuttaa poikkeamia suuntautuneisuuteen. Myös kappaleen muoto ja siitä aiheutuvat jännityshuiput voivat aiheuttaa poikkeamia kohtisuoraan suuntautumiseen. Säröt ovat yleensä muodoltaan suoraa ja haarautumattomia paksuussuunnassa, mutta muuttuvat jäännösjännityskentät tai jännitysten uudelleenjakautuminen särön kasvun aikana saattavat aiheuttaa mutkittavaa särönkasvua. Muoto on yleensä suora myös pinnan suunnassa. Särö kasvaa tavallisesti rakeiden läpi ja sen eteneminen on riippumaton myös muista mikrorakenteellisista seikoista. Vaurioituneella alueella on yleensä vain yksi tai korkeintaan muutama särö. [12]

Lähteen [12] tutkimuksissa säröt olivat saaneet alkunsa muodon aiheuttamista jännityshuipuista tai hitsin sularajalta riippumatta siitä, oliko kyseessä ferriittinen matalaseosteinen teräs tai austeniittinen ruostumaton teräs. Särö on tavallisesti kapea johtuen matalasta pinnankarheudesta ja korrosiotuotteiden puuttumisesta särön sisäältä. Leveyteen vaikuttavat kuitenkin voimak-

Taulukko I. Väsymissäröjen leveyden arvot ferriittisissä matalaseosteisissa teräksissä [12].

	Särön leveys pinnassa [μm]			Särön leveys särön sisällä [μm]					
	Mekaaninen väsyminen	Terminen väsyminen	Korroosioväsyminen	Mekaaninen väsyminen		Terminen väsyminen		Korroosioväsyminen	
				Puoli-välissä	Särön kärjessä	Puoli-välissä	Särön kärjessä	Puoli-välissä	Särön kärjessä
Lukumäärä	6	6	20	7	7	6	6	20	20
Minimi	5	25	20	3	1	20	2	5	2
Maksimi	160	250	700	100	20	100	25	360	120
Keskiarvo	63,7	84,2	149	37,1	8,1	60	12	72,5	26,3
Mediaani	56	45	70	20	10	50	10	35	15
RMS	87,4	114	231	51,5	10,2	67,3	14,5	112	41,1
Vakiopoikkeama	65,5	85,2	181	38,6	6,6	33,5	8,8	88,2	32,4

Taulukko II. Väsymissäröjen leveyden arvot austeniittisissa ruostumattomissa teräksissä [12].

	Särön leveys pinnassa [μm]			Särön leveys särön sisällä [μm]					
	Mekaaninen väsyminen 1)	Terminen väsyminen	Korroosioväsyminen	Mekaaninen väsyminen 1)		Terminen väsyminen		Korroosioväsyminen	
				Puoli-välissä	Särön kärjessä	Puoli-välissä	Särön kärjessä	Puoli-välissä	Särön kärjessä
Lukumäärä	6	18	1	6	6	20	20	1	1
Minimi	3	5	—	3	0,5	2	1	—	—
Maksimi	250	380	—	250	30	190	18	—	—
Keskiarvo	55,5	59,1	12	50	9,33	32,2	7,9	10	5
Mediaani	17,5	27,5	—	12	7,5	22,5	9	—	—
RMS	103,9	102,4	—	103	13,7	51	9	—	—
Vakiopoikkeama	96,2	86,0	—	98,2	11	40,5	4,4	—	—

1) Mukana myös kolme martensiittis-austeniittista ruostumatonta terästä

kaasti särön tasoa vastaan kohtisuorat ulkoisista ja sisäisistä kuormista aiheutuvat jännitykset. Leveydessä ei ollut merkittäviä materiaalista johtuvia eroja, arvojen ollessa tyypillisesti 20–50 μm . Tarkemmat arvot ovat taulukoissa I ja II. Pinnan karheudessa ei ollut merkittävää eroa austeniittisen ruostumattoman ja matalaseosteisen ferriittisen teräksen välillä (taulukko VII). Kärjen morfologia on pääasiassa haarautumaton ja kärki on terävä. Särön kärjen säde on samaa luokkaa sekä ferriittisissä matalaseosteisissa teräksissä että austeniittisissä ruostumattomissa teräksissä. Taulukossa VI on vertailtu eri särötyyppien yleisiä ominaisuuksia. [12]

7.1.2 Terminen väsyminen

Termissä väsymisessä särön ydintyminen ja kasvu on seurausta vaihtelevista lämpökuormista, jotka aiheuttavat veto- ja puristusjännityksiä lämpölaajenemisen takia. Särö kasvaa rakeiden läpi sekä pinnan suunnassa että paksuussuunnassa [13]. Vaurioituneella alueella on yleensä useita säröjä. Säröjen suuntautuminen on satunnaisempaa kuin mekaanisessa väsymisessä johtuen selkeän pääjännityssuunnan puuttumisesta. Säröt ovat pinnan suhteen mosaiikkikuvion mukaisia, mutta mikäli selvä pääjännityssuunta on olemassa, on suuntautuminen pinnan suhteen selkeäm-

Taulukko III. IGSCC säröjen leveydet matalaseosteisissa ja austeniittisissa ruostumattomissa teräksissä [12].

	Särön leveys pinnassa [μm]		Särön leveys särön sisällä [μm]			
	IGSCC matalaseosteinen teräs 1)	IGSCC austeniittinen	IGSCC matalaseosteinen 1)		IGSCC austeniittinen	
			Puoli-välissä	Särön kärjessä	Puoli-välissä	Särön kärjessä
Lukumäärä	13	33	13	12	33	32
Minimi	5	5	2	1	3	1
Maksimi	200	200	80	40	250	25
Keskiarvo	45,5	43,2	20,1	5,3	32,3	5,4
Mediaani	20	30	10	1	18	3
RMS	72,4	57,8	30,1	11,8	56,7	7,8
Vakio-poikkeama	58,6	39,0	23,4	11,0	47,2	5,8

1) matalaseosteisiin ferriittisiin teräksiin on tutkimuksessa otettu mukaan matalahiiliset teräkset, mikroseostetut hienorakeiset teräkset, matalaseosteiset korkean lämpötilan teräkset sekä nuorrutusteräkset

Taulukko IV. IDSCC ja IGSCC säröjen leveydet nikkelipohjaisissa seoksissa [12].

	Särön leveys pinnassa [μm]		Särön leveys särön sisällä [μm]			
	IDSCC	IGSCC	IDSCC		IGSCC	
			Puoli-välissä	Särön kärjessä	Puoli-välissä	Särön kärjessä
Lukumäärä	6	15	6	5	17	14
Minimi	10	4	6	3	2	1
Maksimi	120	100	60	10	260	20
Keskiarvo	48,33	24,1	27,7	5,6	30,5	4,1
Mediaani	21	15	16	5	7	1
RMS	65,5	34,2	36,2	6,1	69,1	6,8
Vakio-poikkeama	48,4	25,2	25,5	2,6	63,9	5,7

Taulukko V. TGSCC säröjen leveydet [12].

	Särön leveys pinnassa [μm]		Särön leveys särön sisällä [μm]			
	TGSCC matalaseosteinen teräs	TGSCC austeniittinen teräs	TGSCC matalaseosteinen teräs		TGSCC austeniittinen teräs	
			Puoli-välissä	Särön kärjessä	Puoli-välissä	Särön kärjessä
Lukumäärä	4	21	4	4	25	20
Minimi	20	3	15	1	1	1
Maksimi	300	500	200	20	200	100
Keskiarvo	217	49,1	68,8	7	24,3	8,6
Mediaani	275	20	30	3,5	10	3,5
RMS	246	115	103	10,4	46,0	22,8
Vakio-poikkeama	134	106	88,2	8,8	39,9	21,7

Taulukko VI. Eri särötyyppien yleiset ominaisuudet [12].

Ominaisuus		Suuntautuneisuus [°]		Muoto		Säröjen määrä 7)	Haarautuneisuus
Särön tyyppi	Materiaaliryhmä	Syvyys-suunnassa	Pinnan suunnassa	Syvyys-suunnassa	Pinnan suunnassa		
Mekaaninen väsyminen	Ferriittinen matalaseosteinen	90	1)	suora	suora ⁵⁾	1–2	ei
	Austeniittinen ruostumaton	60–90	1)	suora mutkitteleva		1–3	ei
Terminen väsyminen	Ferriittinen matalaseosteinen	90	1)	suora	mutkitteleva	>10	harvoin
	Austeniittinen ruostumaton	85–90	mukulakivi-kuvio	suora taipunut	mukulakivi-kuvio	>5	harvoin
Korroosioväsyminen	Ferriittinen matalaseosteinen	90	1)	suora mutkitteleva	5)	1–3	joskus
	Austeniittinen ruostumaton	90	1)	suora taipunut mutkitteleva	5)	2	ei
IGSCC	Ferriittinen matalaseosteinen	90	1) 2)	suora mutkitteleva	5)		joskus 6)
	Austeniittinen ruostumaton	80–90	1)	mutkitteleva siksak, 5)	suora	<4	joskus 6)
	Nikkelipohjainen seos	60–90	1)	mutkitteleva suora haarautunut	suora	1–3	joskus
TGSCC	Ferriittinen matalaseosteinen	75–90	1)	suora	5)	1	joskus 6)
	Austeniittinen ruostumaton	45–90	0–90	haarautunut	haarautunut	>5	kyllä
IDSCC	Nikkelipohjainen seos	45–90	5)	mutkitteleva-suora	mutkitteleva	1	harvoin
Hitsiviat	Kaikki	3)	4)	suora	5)	1	6)

- 1) Pääjännityssuunnat tai muototekijöihin liittyvät jännityshuiput määräävät.
- 2) Hitsauksen tai kylmämuokkauksen aiheuttamat jäännösjännitykset määräävät.
- 3) Liitosvirheitä ja kylmähalkeamia kontrolloi hitsausliitoksen geometria.
- 4) Liitosvirheet ja kylmähalkeamat ovat hitsin kanssa yhdensuuntaisia.
- 5) Hitsausliitoksen geometria määräävä.
- 6) Yleinen mikroskooppisella tasolla.
- 7) Makrohalkeamien määrä vaurioituneella alueella, lähellä arvioitua säröä.

pää. Lähteen [12] tutkimuksissa mosaiikkikuvion muodossa säröjen määrä vaurioituneella alueella oli suuri, mutta myös suorita säröjä oli vaurioituneella alueella enemmän kuin viisi. Suuntautuminen paksuussuunnassa on tavallisesti kohtisuorassa pinnan suhteen. Korkeissa lämpötiloissa särön pinnat ja kärki hapettuvat, mikä saattaa vaikuttaa särön leveyteen ja kärjen säteeseen. [12]

Lähteen [12] tutkimuksissa ferriittisissä mata-

laseosteisissa teräksissä säröjen muoto oli paksuussuunnassa suora, eikä niissä esiintynyt taipumusta haarautumiseen. Austeniittisissa ruostumattomissa teräksissä särön muoto oli suora, taipunut tai mutkitteleva. Säröjen leveys on samaa luokkaa mekaanisen väsymisen aiheuttamien säröjen kanssa, kun kyseessä on sama materiaali, mutta leveys on jonkin verran pienempi austeniittisissa ruostumattomissa teräksissä kuin

Taulukko VII. Eri särötyyppien pinnankarheet eri materiaaleissa [12].

Särötyyppi	Särön pinnan karheus, Rz, [µm]											
	Mekaaninen väsyminen		Terminen väsyminen		Korroosioväsyminen	IGSCC			IDSCC	TGSCC		
Materiaali	CS 1)	SS 2)	CS	SS	CS	CS	SS	Ni 3)	Ni	CS	SS	Ni
Lukumäärä	6	6	4	20	18	13	37	16	13	4	24	3
Minimi	12	10	6	6	5	10	8	8	5	20	10	17
Maksimi	40	212	20	140	100	128	169	142	288	136	90	34
Keskiarvo	23,7	49,3	12,2	65,2	38,6	44,8	71,9	40,7	121,6	58	37,4	24,7
Mediaani	22,5	13,5	11,5	65,2	28	32	68	27	78,6	38	34,5	23
RMS	25,5	88,3	13,5	74,4	46,5	55,0	83	51,9	158,8	73,8	44,0	25,6
Vakiopoikkeama	10,3	80,2	6,45	36	26,6	33,4	42,2	33,3	106,4	52,7	23,6	8,6

1) Matalaseosteinen teräs 2) Ruostumaton teräs 3) Nikkelipohjainen seos

ferriittisissä matalaseosteisissa teräksissä. Tarkemmat tulokset ovat taulukoissa I ja II. Särön pinnankarheus ja tulosten hajonta on suurempi austeniittisissa ruostumattomissa kuin ferriittisissä matalaseosteisissa teräksissä, keskiarvojen ollessa edelliselle 65 µm ja jälkimmäiselle 11 µm (taulukko VII). Kärjen säde on molemmilla materiaaleilla samaa luokkaa, mutta austeniittisissa ruostumattomissa teräksissä esiintyy kärjen mikrohaarautumista. Taulukossa VI on eri särötyyppien yleiset ominaisuudet. [12]

7.1.3 Korroosioväsyminen

Korroosioväsymissä säröjen ydintymisessä ja kasvussa tai molemmissa korroosio on merkittävä tekijä, ja se vuorovaikuttaa mekaanisten tai lämpökuormien kanssa. Korroosioväsymisessä särön kasvu edellyttää rakenteessa vaikuttavien kuormien vaihtelua, kun taas jännityskorroosiossa särö kasvaa kuormituksen ollessa vakio. Toinen tapa korroosioväsymisen ja jännityskorroosion erottamiseen on särönkasvunopeus, mikä korroosioväsymisessä on kuormanvaihtokerroista riippuvainen ja jännityskorroosiossa ajasta riippuvainen [14]. Ominaista korroosioväsymissä säröille on suuri säröjen määrä vaurioituneella alueella, taipumus haarautumiseen, huomattavat määrät korroosiotuotteita särön sisällä sekä tylpistynyt särön kärki [12]. Särö voi edetä joko raerajoja pitkin tai rakeiden läpi [15].

Lähteen [12] tutkimuksissa säröjen muoto oli ferriittisissä matalaseosteisissa teräksissä paksuussuunnassa suora, kaareva tai mutkitteleva ja jotkut säröistä olivat haarautuneita, 1–3 haaraa/särö. Suuntautuminen oli kohtisuorassa pintaa vastaan. Austeniittisissa ruostumattomissa teräksissä oli tutkittavana vain yksi särö, jonka muoto oli mutkitteleva ilman haarautumista. Säröjen leveys oli yleisesti suurempi kuin mekaanisessa tai termisessä väsymisessä ja arvojen hajonta oli myös suurempaa, johtuen särön sisällä tapahtuvasta korroosioista (taulukko I ja taulukko II). Ferriittisissä matalaseosteisissa teräksissä särön leveys pinnassa on keskimäärin 150 µm, ja puolella välissä syvyysuuntaan 70 µm. Säröjen pinnankarheus ja arvojen hajonta oli suurempi kuin mekaanisessa ja termisessä väsymisessä, keskimäärin 40 µm (taulukko VII). Korroosioväsymissä säröjen yleisiä ominaisuuksia on esitetty taulukossa VI. [12]

7.1.4 Jännityskorroosio

Jännityskorroosiosärön syntymiseen vaikuttavia tekijöitä ovat lämpötila, korrodoivan ympäristön koostumus, metallin koostumus, jännitys ja metallin rakenne [16]. Lähteen [12] mukaan jännityskorroosiosärö saa alkunsa jännityksen ja korroosioympäristön yhteisvaikutuksena, missä jännitykset voivat olla lähtöisin ulkoisista kuormista tai kappaleen sisäisistä jäännösjännityksistä. Jän-

nityskorroosiosärön kasvulle ratkaisevia ovat jäännösjännitykset hitsatuissa rakenteissa, joita ei ole hitsauksen jälkeen lämpökäsitelty. Kylmämuokkauksesta aiheutuvat jäännösjännitykset ja faasimuutokset ovat myös merkittävä myötävai- kuttaja jännityskorroosiosärön ydintymiselle ja kasvulle. Lähteen [13] mukaan jännityskorroosi- on esiintymiseen hitsausliitoksessa tarvitaan seu- raavien kolmen tekijän yhteisvaikutus: herkistynyt materiaali, vetojännitys ja kemiallinen ympä- ristö, joka tekee säröytymisen mahdolliseksi. Rae- rajajännitys-korroosiosärön (IGSCC) kasvua kont- rolloivat jännitykset, mutta se on myös huomatta- vasti riippuvainen mikrorakenteesta, mikä aihe- uttaa poikkeamia puhtaasti jännityksen kontrol- loimaan särön kasvusuuntaan. Särö kasvaa yleensä kohtisuoraan vaikuttavaan jännitykseen ver- rattuna [16]. Taulukkoon VI on koottu jännitys- korroosiosäröjen yleiset ominaisuudet.

Raerajoja pitkin etenevä särön kasvu tekee IGSCC säröistä mutkittlevampia ja haarautu- vampia verrattuna väsymissäröihin. Rakeiden läpi etenevät jännityskorroosiosäröt (TGSCC) ovat tyypillisesti runsaasti haarautuneita. Jännitys- korroosiosäröjen sisälle ei muodostu suuria mää- riä korroosiotuotteita, mikä mahdollistaa kapean särön elleivät kappaleessa vaikuttavat jännityk- set levitä säröä. Vanhojen säröjen sisälle muodos- tuu kuitenkin usein sekundäärisiä korroosiotuo- teita. Lähteessä [12] selvitettyjä IGSCC säröjen leveyksiä austeniittisissa ruostumattomissa te- räksissä ja matalaseosteisissa teräksissä on esi- tetty taulukossa III. Taulukossa IV on esitetty samassa tutkimuksessa selvitettyjä IGSCC ja ID- SCC säröjen leveyksiä nikkelipohjaisissa seoksis- sa. TGSCC säröjen leveyksiä samasta tutkimuk- sesta on esitetty taulukossa V. Särön pinnankar- heus on läheisesti riippuvainen materiaalin sä- röytyneen alueen raekoosta, millä tarkoitetaan särön sijaitessa esimerkiksi hitsin muutosvyöhyk- keessä sen kasvanutta raekokoa, eikä perusai- neen raekokoa. Lähteessä [12] selvitettyjä pin- nankarheuksia on esitetty taulukossa VII. Jänni- tuskorroosiosäröjen kärki on usein terävämpi kuin väsymissäröillä. Särön haarautuminen kärjen lä- heisyydessä on myös yleisempää jännityskorroosi- osäröillä kuin väsymissäröillä [12]. IASCC säröt etenevät yleensä raerajoja pitkin ja ovat muodol- taan haarautuvia [17].

7.2 Vikojen valmistustavat

Vikojen valmistuksessa koekappaleisiin voidaan käyttää erilaisia menetelmiä, kunhan viasta tar- kastettaessa saatava vaste on samanlainen kuin aidolla käytössä syntyneellä vialla. Mikäli koekap- paleita ei ole tarkoitus rikkoa säröjen todellisen koon määrittämiseksi käytännön kokeiden jäl- keen, tulee särönvalmistuksessa käytettävien pa- rametrien perusteella tai jollain muulla tavalla pystyä määrittelemään syntyvien säröjen koko riittävällä tarkkuudella. Säröjen valmistuksesta koekappaleisiin löytyi vain lyhyitä mainintoja kir- jallisuudessa, mikä johtuu osaltaan todennäköi- sesti siitä, että kehitetyt valmistusmenetelmät ovat liikesalaisuuksia.

7.2.1 Vikojen istuttaminen

Vikojen istuttamisella tarkoitetaan sitä, että käy- tössä syntynyt tai valmistettu vika leikataan irti alkuperäisestä komponentista ja istutetaan hit- saamalla koekappaleeseen.

Hitsauksessa syntyy materiaalin rakenteeseen muutoksia, jotka vaikuttavat ultraäänen kulkuun. Hitsiaine jähmettyy suuntautuneesti, jolloin muo- dostuu alkuperäisestä mikrorakenteesta poikkeava rakenne. Ultraäänen taittuminen ja hajonta kiteiden rajalta aiheuttaa ultraäänen poikkeavan kulkuradan verrattuna alkuperäiseen rakentee- seen. Tällöin tarkastus ei vastaa todellisen tar- kastuskohteen tarkastusta ja pahimmassa tapa- uksessa ultraääni saattaa taittua niin, että tar- kastusalueelle jää katvealueita. Hitsin viereen syntyy myös kasvaneen raekoon alue, missä ult- raäänen kulku poikkeaa alkuperäiseen verrattu- na.

Edellä mainitut rakennemuutokset ovat mer- kittäviä, kun istutus tehdään austeniittiseen ma- teriaaliin, missä ultraäänen vaimeneminen on huomattavaa.

Loviisan ydinvoimalaitoksen primääripiirin hitsien automatisoidun ultraäänitarkastuksen pä- tevöinnin yhteydessä tehdyissä kokeissa käytet- tiin koekappaletta, jossa oli istutettuja vikoja. Saatujen kokemusten mukaan istutushitsien ai- heuttama kohina oli merkityksetöntä, kun kappal- eiden istuttamisessa käytettiin elektronisuihku- hitsausta. Käytettäessä manuaalista hitsausta vi-

kojen istuttamisessa perusaineeseen, voitiin istutukset havaita johtuen istutushitsien aiheuttamasta suuremmasta kohinasta, mutta kun istutus tehtiin hitsiaineeseen, ei kohina paljastanut istutuksen sijaintia. [18]

7.2.2 Hitsaamalla valmistetut viat

Hitsauksessa syntyy erilaisia vikoja, kuten huokosia, kuonasulkeumia, erilaisia liitosvikoja ja kuuma- sekä kylmähalkeamia. Tässä työssä keskitytään kuitenkin käytön aikana syntyneiden särömaisten vikojen etsimisessä ja koonmäärittämisessä käytettyjen NDT-menettelmien päteväntiin.

Hitsaamalla valmistetuista vioista kuumahalkeamaa voidaan ajatella käytettäväksi muiden särötyyppien jäljittämiseen. Kuumahalkeama saadaan koekappaleessa haluttuun kohtaan työstämällä siihen halutun kokoinen ura, joka sen jälkeen hitsataan täyteen. Uran geometriasta johtuen hitsiin muodostuu kuumahalkeama, jonka syntymistä voidaan parantaa käyttämällä haurastaa lisäainetta.

SwRI (Southwest Research Institute) on kehittänyt ferriittisille materiaaleille jähmettymissäröjen valmistustekniikan, jolla heidän mukaansa saadaan halutun kokoinen särö. Särö tehdään edellä mainitulla tavalla alkuloveen hitsaamalla. [19]

Hitsauksessa materiaalin rakenne muuttuu hitsin kohdalta. Hitsin jähmettyessä muodostuu hitsiin suuntautunut mikrorakenne ja hitsin viereen alue, jossa on tapahtunut rakeenkasvua. Muuttunut mikrorakenne ei vastaa alkuperäistä, ja aiheuttaa ultraäänen taittumista ja sirontaa alkuperäisestä rakenteesta poikkeavasti. Ultraääni saattaa pahimmassa tapauksessa taittua niin, että hitsiin jää katvealueita, joita ei näin tule tarkastettua lainkaan. Austeniittisilla materiaaleilla, joissa ultraäänen vaimeneminen on voima-

kasta aiheuttaa hitsauksesta johtuva mikrorakenteen muutos erilaisen vasteen verrattuna puhtaiseen perusaineeseen. Hitsin aiheuttama kohina myös paljastaa tarkastajalle vian sijainnin.

7.2.3 Muita menetelmiä

Kipinätyöstöllä saadaan valmistettua uria, jotka ovat muodoltaan suoria. Mikäli urat voitaisiin tehdä läpi kappaleen, voitaisiin käyttää lankamenetelmää ja saataisiin kapeampia uria. Ohuimmat langat ovat 0,1 mm:stä ylöspäin. Kapein saatava ura määräytyy niin, että langan paksuuden lisäksi leveyttä kasvattaa kipinäväli. Uran valmistuksessa joudutaan käyttämään paksumpaa elektrodia, jolloin kapeimmat urat olisivat luokkaa 0,3 mm. Ura on elektrodista johtuen samanlevyinen koko pituudeltaan. Uran kärjestä tulee tylppä, mikä ei vastaa käytössä syntyvän särön kärkeä ja on helpompi havaita kuin terävä kärkinen särö.

Kipinätyöstöllä saadut urat ovat leveydeltään selvästi käytössä syntyneitä säröjä suurempia, mikä tekee niiden havaittavuuden merkittävästi helpommaksi aitoihin säröihin verrattuna. Kipinätyöstettyjä uria voidaan ajatella käytettäväksi esimerkiksi parametritutkimuksissa, mutta varsinaisissa päteväntikoe-kappaleissa niitä ei voida käyttää säröjen jäljittämiseksi.

Mikäli kipinätyöstöä käytetään alkusärön tekemiseen ja särö kasvatetaan väsyttämällä saadaan särön leveydestä todellisuutta vastaava ja kärjestä terävä. Jotta tällaista säröä voitaisiin käyttää päteväntikoe-kappaleessa, tulisi kipinätyöstetty alkuosa koneistaa pois, ettei se suuremman leveyden takia tee särön havaitsemista liian helpoksi. Mikäli sitä ei koneisteta pois aiheuttaa se käytännön kokeiden suorittamisen vääränlaisilla koekappaleilla ja johtaa tätä kautta epäonnistuneeseen päteväntiin.

8 KOKEELLINEN OSUUS

Tämän työn yhteydessä tutkittiin särön valmistamista termisellä väsytyksellä. Tavoitteena oli selvittää termisellä väsytyksellä valmistettujen säröjen käyttökelpoisuutta NDT-menettelmien pätevöinnissä käytettävissä koekappaleissa. Koelaitteistolla saadaan aikaiseksi termiselle väsymiselle ominainen säröverkko, joten tässä työssä pyrittiin selvittämään saadaanko menetelmällä myös yksittäisiä säröjä, mikä laajentaisi laitteiston ja menetelmän käytettävyyttä pätevöintikoekappaleiden valmistuksessa huomattavasti. Tämä edellyttää, että laitteistolla saadaan hallitusti aikaan mitoiltaan erikokoisia säröjä. Myös säröjen sijainti ja suuntautuneisuus tulee olla vaihdeltavissa. Termisellä väsytyksellä valmistetut säröt valittiin siksi, että ne ovat vaikeampia tarkastaa kuin mekaanisen väsymisen aiheuttamat säröt ja siksi, että esimerkiksi ASME Code Section XI ei vaadi erityisesti jännityskorroosiosäröjen käyttämistä pätevöintikoekappaleissa, vaan osa niissä käytettävistä säröistä tulee olla joko termisiä väsymissäröjä tai jännityskorroosiosäröjä. Kokeet suoritettiin Teknillisen korkeakoulun Konetekniikan osaston Materiaalitekniikan laboratoriossa.

8.1 Koelaitteisto

Kokeissa käytetty laitteisto on Teknillisen korkeakoulun Konetekniikan osaston Materiaalitekniikan laboratoriossa suunniteltu ja toteutettu. Toimintaperiaatteena on, että kappaletta kuumennetaan kuumennuskelalla ja jäähdytetään kokeeseen sopivalla väliaineella. Kuumennus tehdään induktioperiaatteella ja jäähdytys voidaan tehdä ruiskuttamalla vettä tai puhaltamalla ilmaa tai upottamalla kappale jäähdytysastiaan. Jäähdytysväliaineena voidaan käyttää myös muita kaasumaisia tai nestemäisiä aineita. Koekappale voi olla muodoltaan ja kooltaan melkein millainen tahansa, koska kuumennuskela voidaan muotoilla koekappaleen mukaan. [20]

Koelaitteisto koostuu seuraavista osista: induktiokuumentimen jäähdytysyksikkö, induktiokuumentimen virtalähde, pakotetun jäähdytyksen suuttimet, induktiokuumennuskela, koekappaleen kiinnitin, ohjausyksikkö, ohjaustietokone ja induktiokuumentimen korkeataajuusyksikkö. Induktiokuumentimen korkeataajuusyksikkö toimii 30–300 kHz:n taajuuksilla ja 20 kW:n teholla. [20]

8.1.1 Kuumennuskela

Kuumentamiseen käytetty induktiokela on pyöreästä kupariputkesta valmistettu kela. Käytetty kupari on elektrolyyttistä kuparia, jonka sähkön-

johtavuus on mahdollisimman hyvä. Kelan jäähdyttämiseksi sen sisällä kiertää vesi. Kelan tulee olla joka kohdasta yhtä kaukana koekappaleen pinnasta, jotta kuumennettavan alueen lämpötilajakauma on tasainen. Tämän takia kela joudutaan muotoilemaan koekappaleen muotojen mukaan. Tästä johtuen joudutaan valmistamaan eri kelat aksiaalisille ja kehäsuuntaisille vioille sekä esimerkiksi hitsin muutosvyöhykkeelle juuripalon takia.

Kaikki kokeissa käytetyt kelat valmistettiin Teknillisen korkeakoulun Konetekniikan osaston Materiaalitekniikan laboratoriossa. Ennen varsinaisten väsytysten aloittamista kokeiltiin erilaisia keloja vaaditun lämpötilan ja lämpökuvion saavuttamiseksi. Kokeissa käytettyjä keloja on kuvassa 1.

8.1.2 Lämpötilan kalibrointi

Kokeissa ei jäljitellä mitään käyttölämpötilaa, vaan pyritään saamaan hallitusti aikaiseksi säröjä koekappaleisiin. Tästä johtuen lämpötilan tarkka määrittäminen ei ole tarpeen. Lämpötila pyrittiin kuitenkin pitämään alle 800 °C, jotta vältetään suurilta mikrorakenteen muutoksilta, kuten rakeenkasvulta, jotka saattavat muuttaa materiaalin tarkastettavuutta ultraäänellä.

Ennen varsinaisten kokeiden aloittamista kokeiltiin erilaisia keloja riittävän korkean lämpötilan saavuttamiseksi. Lämpötilaa mitattiin ensin

Taulukko IX. Austeniittisen ruostumattoman teräksen SA376TP304 kemiallinen koostumus.

C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
0,047	1,47	0,34	18,37	10,20	0,009	0,028

koostumus on esitetty taulukossa IX. Käytetyt hitsausohjeet ja lisäainetodistukset sekä materiaalitodistukset ovat liitteessä 4, materiaalin sulatusnumero on 76533.

8.3 Koeohjelma ja tulokset

Kokeiden päätarkoituksena oli selvittää valmistettavien säröjen käyttökelpoisuutta NDT-menetelmien pätevyyksessä käytettävissä koekappaleissa. Käytettävyyttä edellyttää säröiltä seuraavia ominaisuuksia:

- särön morfologian on vastattava siinä määrin aitoa säröä, että NDT-menetelmillä tarkastettaessa saatava vaste on samanlainen kuin aidolla säröllä
- jotta menetelmää voitaisiin käyttää myös muiden kuin termisten väsymissäröjen jäljittelemiseen, täytyy pystyä valmistamaan myös yksittäisiä säröjä termiselle väsymiselle ominaisen säröverkon lisäksi
- yksittäisten säröjen suuntautuneisuuden tulee olla vaihdeltavissa
- mikäli koekappaleita ei ole tarkoitus rikkoa päteväntikokeen jälkeen, valmistettavien säröjen kokoa pitäisi pystyä arvioimaan joko väsytyksen aikana tai väsytyksessä käytettävien parametrien perusteella riittävällä tarkkuudella
- säröjen koon vaihteluala on käytännössä laaja, mikä edellyttää myös valmistettavien säröjen pituudelta ja syvyydeltä laajaa vaihtelua
- säröjä täytyy pystyä valmistamaan erikokoisiin ja -muotoisiin kappaleisiin, mistä seuraa laaja ainepaksuusalue.

Hitsatuissa koekappaleissa olevat hitsausliitokset tarkastettiin ennen kokeita radiografisesti ja tunkeumanesteellä eheyden varmistamiseksi. Tunkeumanestetarkastukset tehtiin koekappaleiden ulkopinnoille. Koska sisäpinnoille ei tehty tarkastusta on mahdollista, että siellä oli mikroskooppisia säröjä tai pieniä särön alkuja. Tällä ei katsottu kuitenkaan olevan merkitystä särön kasvun seu-

rannassa, koska ainakaan vielä ei ole olemassa matemaattista mallia tai muuta tarkoitukseen sopivaa menetelmää särönkasvun tarkkaan seuraamiseen, joka edellyttäisi alkusärön koon tuntemista.

Säröt tarkastettiin ultraäänellä, jotta saatiin käsitys siitä, miten hyvin ne vastaavat todellisia säröjä. Ultraäänitarkastuksen tarkoituksena ei ollut selvittää löytyykö säröjä, vaan määrittää niiden koko ja vastaavuus todellisten säröjen kanssa. Väsytyville kohdille tehtiin tunkeumanestetarkastus, ettei säröjen etsimiseen tarvinnut uh rata aikaa, jota oli rajoitetusti käytettävissä. Tunkeumanestetarkastuksen pöytäkirjan liitteenä on särökartta, jossa säröt on numeroitu. Samaa numerointia käytetään tästä eteenpäin säröjen tunnistena siten, että hitsatussa koekappaleessa olevien säröjen numeron eteen tulee kirjain W. Tunkeumanestetarkastuksen pöytäkirja on liitteenä 3.

Näissä kokeissa käytettyä laitteistoa ei ole aikaisemmin käytetty säröjen valmistukseen, vaan sillä on lähinnä jäljitelty käyttöolosuhteita materiaalien termisen väsymisen keston määrittelemiseksi. Tästä syystä kokeita ohjattiin saatujen tulosten mukaan sopivaksi katsottuun suuntaan, eikä tarkkaa koeohjelmaa väsytyksparametreineen laadittu etukäteen.

Jotta voidaan todistaa, että säröjä saadaan halutulla tavalla suuntautuneena, täytyy ensin pystyä valmistamaan yksi tai yksittäisiä säröjä. Termisessä syklissä materiaalin pintaan ydintyy säröjä lämpölaajenemisen aiheuttamien jännitysten takia. Nämä säröt ydintyvät sattumanvaraisesti kappaleen kuumennetulle alueelle. Jotta nämä ydintyneet mikrosäröt saataisiin kasvamaan yhteen, muotoiltiin kela niin, että kuumennuskuvioista muodostuu pitkä ja kapea. Näin saatiin lämpölaajenemisesta aiheutuvat jännitykset suuremmiksi toiseen suuntaan, ja säröt mahdollisesti kasvamaan vain haluttuun suuntaan.

Kuumennettaessa koekappaleen pintaa pyrittiin lämpötila saamaan lähelle 700 °C, jotta lämpölaajenemisesta aiheutuvat jännitykset riittäisivät kasvattamaan säröä. Lämpötilan saaminen riittävän korkeaksi edellytti pitkää kuumennussykliä. Ensimmäisessä kokeessa käytettiin 30 sekunnin kuumennussykliä. Näin pitkällä kuumennusajalla tulee lämmönjohtumisesta merkittävää ja on mahdollista, että kuumennuskuvioista ei tule pitkää ja kapeaa, jolloin särön suuntautuminen on sattumanvaraisempaa. Kuumennuskuvion le-

taa ellipsiä, kuva 8. Murtopinnasta mitattuna särön syvyydeksi saatiin 7,0 mm. Vastaavasti myös säröjen 1 ja 2 suurimmat syvyydet ovat hieman taulukossa XI olevia arvoja suuremmat.

8.3.2 Koe 2

Toiseen kokeeseen valmistettiin kela, jonka muodostaman kuumennuskuvion pidempi sivu on putken aksiaalisuunnassa. Kelan mitat olivat muuten samanlaiset kuin ensimmäisessä kokeessa. Tällä pyrittiin osoittamaan, että säröjen suuntautuneisuutta saadaan vaihdeltua. Kokeen aikana oli kytkettynä myös akustisen emission mittausta myöhempää tarkastelua varten.

Kalibroinnissa saavutettiin yli 788 °C lämpötila, jolloin koekappale oli punahehkuinen kelan alla. Kokeessa kuumennussyklin pituus oli 11 s ja jäähdytysyklin pituus 23 s. Pakotettua jäähdytystä ei katsottu tarpeelliseksi, koska kuumennusaika oli lyhyempi kuin ensimmäisessä kokeessa ja tätä kautta myös lämmönjohtuminen vähäisempää. Jättämällä pakotettu jäähdytys pois, päästiin myös nopeampaan sykliin.

Kela oli kokeen aikana liikkunut hieman, eikä ollut kokeen lopussa enää yhtä lähellä koekappaleen pintaa kuin alkuasetuksessa, eikä näin ollen myöskään saavuttanut yhtä korkeaa lämpötilaa kuin kalibroinnissa. Koe pysäytettiin 1222 syklin jälkeen, jolloin kuumennetusta alueesta otettiin jäljenne. Jäljenteillä seurattiin särön pituuskasvua. Tällä syklimäärällä koekappaleeseen oli syntynyt useita liukunauhoja, joista osa oli yhtynyt, ja näistä oli kasvanut mikroskooppisia säröjä. Myös mikroskooppisia säröjä oli kasvanut yhteen. Jo tässä vaiheessa oli säröjen kasvussa havaittavissa haluttua suuntautumista, ei kuitenkaan erityisen selkeänä. Mikroskooppisia säröjä oli syntynyt myös muihin suuntiin, mutta vain yksittäisiä. Koetta jatkettiin niin, että laitteisto pysäyttää kokeen, kun kokonaissyklimääräksi tulee 2500 sykliä. 2500 syklin jälkeen näytti siltä, että kaksi säröä olisi lähtenyt kasvamaan kun kuumennetua aluetta tutkittiin makroskoopilla ja jäljenteen avulla koekappaleen ollessa vielä ehjä. Koetta oli tarkoitus jatkaa vielä 1500 sykliä, mutta jäähdytyslaitteiden ylikuumentuminen ja koe jouduttiin keskeyttämään. Ennen jäähdytyslaitteen ylikuumentumista ehdittiin tehdä 173 sykliä eli kokeen kokonaissyklimääräksi tuli 2673 sykliä. Koetta ei enää tämän

jälkeen jatkettu, koska oli pystytty osoittamaan, että säröt saadaan kasvamaan haluttuun suuntaan.

Kuumennusalueen puhdistuksen jälkeen koepalaa tutkittiin makroskoopilla. Alueelle oli kasvanut neljä säröä ja kaikki olivat kehäsuuntaisia. Säröjen pituudet esiintymisjärjestyksessä olivat 2,2 mm, 1,4 mm, 3,8 mm ja 1,7 mm. Säröjen muoto pinnassa oli suora ja säröt olivat haarautumattomia. Alueella oli myös mikrosäröjä sattumanvaraisesti suuntautuneena sekä mikrosäröverkkoa, kuva 9.

8.3.3 Koe 3

Kokeessa 3 käytettiin samaa kela kuin kokeessa 2. Kuumennusaikaa vähennettiin edellisen kokeen 11 sekunnista 5 sekuntiin. Tällä tavalla saatiin yli 700 °C lämpötila alueesta lyhyempi kuin edellisessä kokeessa. Tarkoituksena oli kokeilla saadaanko näin syntyvällä pienemmällä kuumennuskuviolla aikaisiksi vain yksittäinen särö. Kokeen kokonaissyklimääräksi tuli 3000 sykliä. Myös tässä kokeessa oli akustisen emission mittausta kytkettynä.

Kokeen aikana ydintyneistä mikrosäröistä oli kasvanut kolme säröä, jotka olivat kaikki kehäsuuntaisia. Säröjen muoto pinnassa oli suora, päissä oli havaittavissa mikrohaarautumista ja keskimmäisen särön kasvu oli pysähtynyt poikittaiseen mikrosäröön, kuva 10. Keskimäinen särö oli kasvanut osan pituudestaan koneistusura pitkin, se oli 3,5 mm pitkä ja kaksi muuta olivat 1,75 mm pitkiä. Nämä säröt sijaitsivat alueella, missä tunkeumanestetarkastuksen mukaan oli säröt 4, 5 ja 6, jollaisia ei kuitenkaan todellisuudessa ollut olemassa. Tunkeumanestetarkastusta varten on tarkastettavan pinnan oltava puhdas, jotta neste voi tunkeutua vikoihin ja saadaan riittävä erottelukyky [21]. Koekappaleiden kuumennetuille alueille oli muodostunut epäpuhtauksia, jotka eivät irtoa tavallisessa puhdistuksessa. Tämä sekä mikrosäröjen antamat näyttämät ovat todennäköisesti osaltaan vaikuttaneet siihen, että tunkeumanestetarkastuksen antamat tulokset eivät vastanneet todellisuutta. Kuumennetuille alueille ei ollut muodostunut selvää mikrosäröverkkoa, vaan suuntautuneita mikrosäröjä aikaisemmin mainittujen säröjen lisäksi. Mittaukset on tehty makroskoopilla kuumennetun alueen puhdistuksen jälkeen.

tusyhtiö A suoritti koekappaleille tunkeumanestetarkastuksen ennen ultraäänitarkastusta, koska tavoitteena oli säröjen määrittäminen eikä etsiminen.

Tarkastusyhtiö A

Tarkastukset suoritti tarkastusyhtiön A palveluksessa oleva nykyisen pätevointijärjestelmän EN 473 taso 3 mukainen ultraäänitarkastaja. Säröt etsittiin väsyttelyä alueelta aaltomuodonmuutosluotaimella, jolla kaikki säröt löytyivät. Tarkastuksessa käytetyt luotaimet olivat WSY66, WSY70 ja 55K4N. Säröjen kokoa määritettiin aaltomuodonmuutostekniikalla. Perusaine koekappaleissa olevien säröjen syvyydet arvioitiin kaikki alle 1 mm syviksi. Shokkiaaltoluotaimella etsittiin säröjen kärkiä, mutta niistä ei saatu kaikua.

Hitsatuissa koekappaleissa olevia säröjä ei pystytty tarkastamaan vaatimusten mukaan, koska hitsikupua ei hiottu pois. Mikäli laitoksella löydetään vika, hiotaan hitsikupu pois niin, että tarkastus voidaan tehdä vaatimusten mukaan. Hitsien yhteydessä olevista vioista arvioitiin syvyydet seuraavasti: vika W1 on 4 mm syvä ja vika W3 on 3 mm syvä. Vikaa W2 ei pystytty arvioimaan hitsikuvun takia. Vioista W4–W6 arvioitiin vika W5 syvimmäksi, 0,5 mm. Hitsikupu esti vian W4 määrittämisen. Tarkastuspöytäkirja on liitteessä 6.

Tarkastusyhtiö B

Tarkastukset suoritti tarkastusyhtiön B palveluksessa oleva nykyisen pätevointijärjestelmän EN 473 taso 3 mukainen ultraäänitarkastaja. Koekappaleille ei suoritettu tunkeumanestetarkastusta, vaan säröt paikallistettiin kuumentulta alueelta aaltomuodonmuutosluotainta käyttäen. Ultraäänitarkastuksen perusteella tehty särökartta on liitteessä 7. Aaltomuodonmuutosluotaimella mitattiin säröjen sijaintia ja pituutta sekä arvioitiin tulisivatko ne havaituiksi käytännön tarkastuksissa. Luotainta ei käytetty syvyyden määrittämiseen. Poikittaisaaltokulmaluotaimella mitattiin säröjen sijainti ja pituus sekä määritettiin syvyys karkikaikutekniikalla. Normaaliuotaimilla mitattiin säröjen syvyyttä kärjen aiheuttaman diffraktiokaiun perusteella. Kaikki perusaineen alueella olevat viat havaittiin aaltomuodonmuutosluotaimella, ja ne tulisivat todennäköisesti myös kirjattavaksi. WSY:n ryömintä-

kaiun CE2 eteen tuleva CE1 ei noussut korkeaksi minkään särön kohdalla, mikä viittaa matalaan säröön. Karkikaikutekniikalla käytettäessä KBA 45-5 -luotainta ei havaittu selvää karkikaikua, mikä myös viittaa matalaan säröön. Säröjen kärkiä etsittiin vielä käyttämällä KBA 5- ja M112-normaaliuotaimia, mutta kärkiä ei havaittu, joten perusainekoekappaleissa olevien säröjen syvyydeksi arvioitiin korkeintaan 1 mm. Raportti tarkastuksesta on liitteessä 8. Ultraäänitarkastuksen perusteella tehdystä särökartasta nähdään, että ultraäänellä löydettiin todelliset säröt, jotka syntyivät kokeissa 2 ja 3. Kokeessa 1 kasvanneista säröistä yksi on jostain syystä ultraäänitarkastuksen mukaan kehäsuuntainen, mikä ei kuitenkaan vastaa todellista tilannetta, missä kaikki kolme säröä ovat aksiaalisesti suuntautuneita.

Hitsien muutosvyöhykkeellä olevat säröt W1 ja W3 näkyvät kaikki aaltomuodonmuutosluotaimella, ja tulisivat todennäköisesti myös kirjattaviksi. Hitsikupu estää säröjen tarkan paikannuksen aaltomuodonmuutosluotaimella. Säröt paikannettiin poikittaiskulmaluotaimella 1,5 hyppäysetäisyyden päästä. Säröjen W1 ja W3 syvyydet pystyttiin mittaamaan suoralla äänitiellä saadun karkikaiun perusteella. Syvyydet olivat 2 mm ja 3 mm, ja molempien pituus oli alle 10 mm. Normaaliuotaimella ei pystytty mittaamaan muutosvyöhykkeellä olevien säröjen syvyyttä huomattoman hitsikuvun takia. Toisen hitsin vieressä olevien säröjen W4, W5, W6 ja W7 määrittäminen ei onnistunut kulmaluotaimella, eikä särön kärkeä saatu näkyviin normaaliuotaimellakaan, minkä takia niiden syvyyden arvioitiin olevan korkeintaan 1 mm. Näiden säröjen pituus oli alle 10 mm. Perusaineessa olevat säröt varjostavat WSY:n ryömintäaaltoa siten, että hitsistä kauempana oleva särö W5 vaikuttaa suuremmalta kuin sularajan vieressä oleva särö W4.

8.4 Tulosten tarkastelu

Ultraäänitarkastuksella saadut tulokset koon määrittämisessä tukevat aikaisempien luotettavuustutkimusten osoittamaa tarvetta päteväinnille, vaikka näin kapealaisilla kokeilla ei voidakaan tehdä pitkälle meneviä johtopäätöksiä. Rikokovan aineenkoetuksen jälkeen määritetyt särön syvyydet poikkeavat selvästi ultraäänellä määritetyistä perusainetta olevan koekappaleen särö-

jen kohdalla. Siinä syvin särö on 7 mm syvä, kun se määritettiin ultraäänellä vain korkeintaan 1 mm syväksi molemmissa tarkastuksissa. Koekappaleen raerakenteessa ei ole tapahtunut normaalia poikkeavaa rakeenkasvua, mikä vaikeuttaisi tarkastusta ultraäänellä. Syvimmän särön kärki oli tylppä, minkä pitäisi helpottaa kärkikaiun löytämistä. Hitsien muutosvyöhykkeellä olevien säröjen koon määrittäminen oli tarkempi, vaikka austeniittisissa ruostumattomissa teräksissä suurimmat vaikeudet liittyvät hitsien ja valujen tarkastuksiin kasvaneen raekoon ja suuntautuneen jäähmettymisen takia.

Säröt löytyivät ultraäänellä varsinkin tarkastusyhtiön B tekemässä tarkastuksessa, jossa ei ollut käytettävissä tunkeumanestetarkastuksen mukaista särökarttaa. Yhtenä syynä toisen tarkastuksen sijainnin määrittämisen epäonnistumiseen on todennäköisesti liian suuri luottamus tunkeumanestetarkastuksen tuloksiin. Täytyy myös ottaa huomioon, että säröjä ei varsinaisesti etsitty ultraäänellä, vaan ne paikannettiin niiltä alueilta, joita oli kuumennettu.

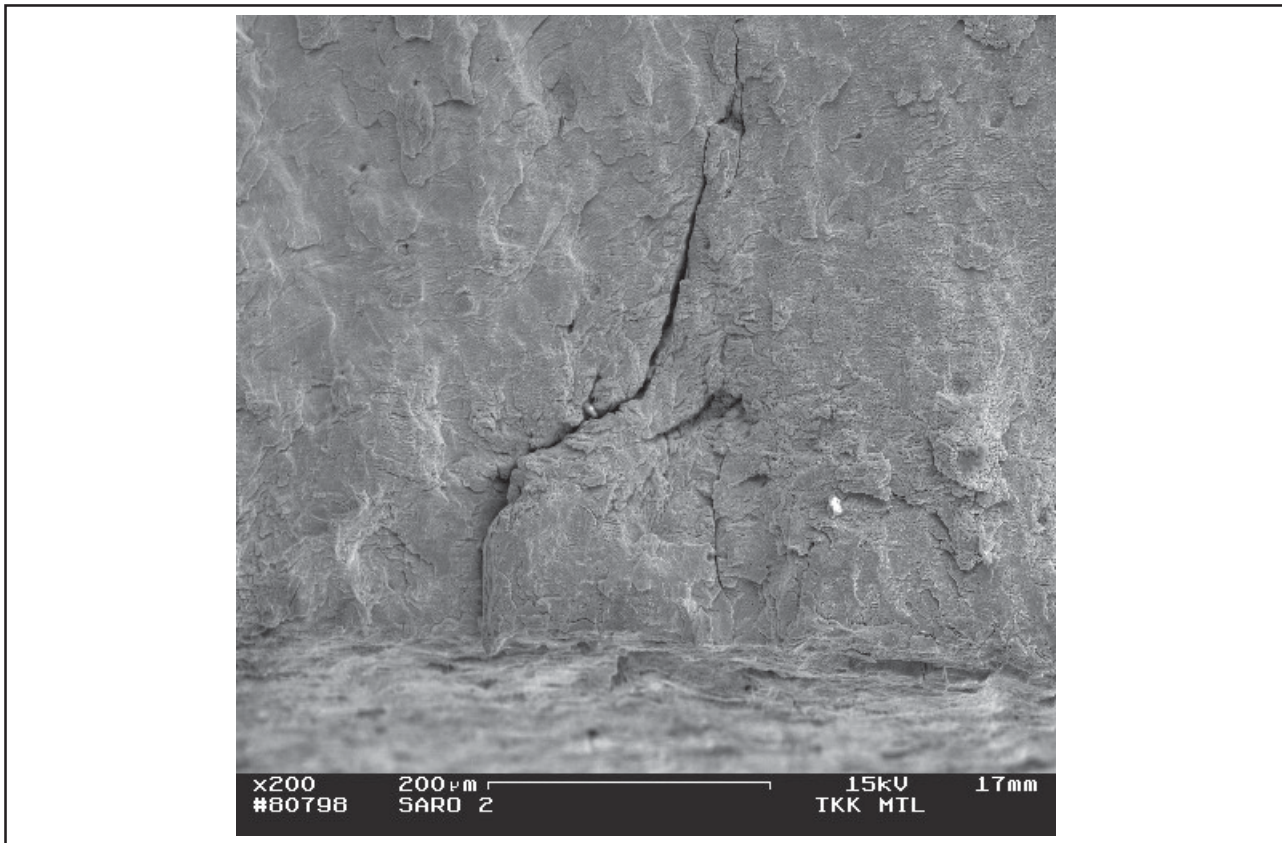
Kokeellisessa osuudessa selvitettiin myös termisellä väsytyksellä syntyneiden säröjen käyttökelpoisuutta NDT-menettelmien päteväisyydessä käytettävissä koekappaleissa. Kokeisiin käytettävissä ollut aika oli rajallinen, joten kaiken kattavaa tutkimusta termisen väsytyksen mahdollisuuksista ei voitu tehdä. Kokeilla pystyttiin kuitenkin osoittamaan, että termisellä väsytyksellä valmistettuja säröjä voidaan käyttää päteväintikoekappaleissa. Edellisessä kappaleessa 8.3 on esitetty vaatimuksia, joita särönvalmistusmenetelmän tulisi täyttää, jotta sitä voidaan käyttää laajemmassa mittakaavassa päteväintikoekappaleiden valmistuksessa. Seuraavissa kappaleissa esitetään saavutetut tulokset säröjen käytettävyydestä päteväintikoekappaleissa.

Särö valmistetaan laboratorio-olosuhteissa, mistä johtuu, että se ei vastaa käytössä syntyneitä säröjä kaikilta ominaisuuksiltaan. Erilaisesta kasvuympäristöstä ja nopeammasta särönkasvusta johtuen särön sisälle ei muodostu yhtä paljon oksidia tai muita korroosiotuotteita kuin käytössä syntyneen särön sisälle. Käytössä kasvanut särö kasvaa huoneenlämpötilaa korkeammassa lämpötiloissa, mikä aiheuttaa sen, että särö on käytön aikana auki lämpölaajenemisen ja vetojännitysten takia. Tarkastukset tehdään, kun laitos on

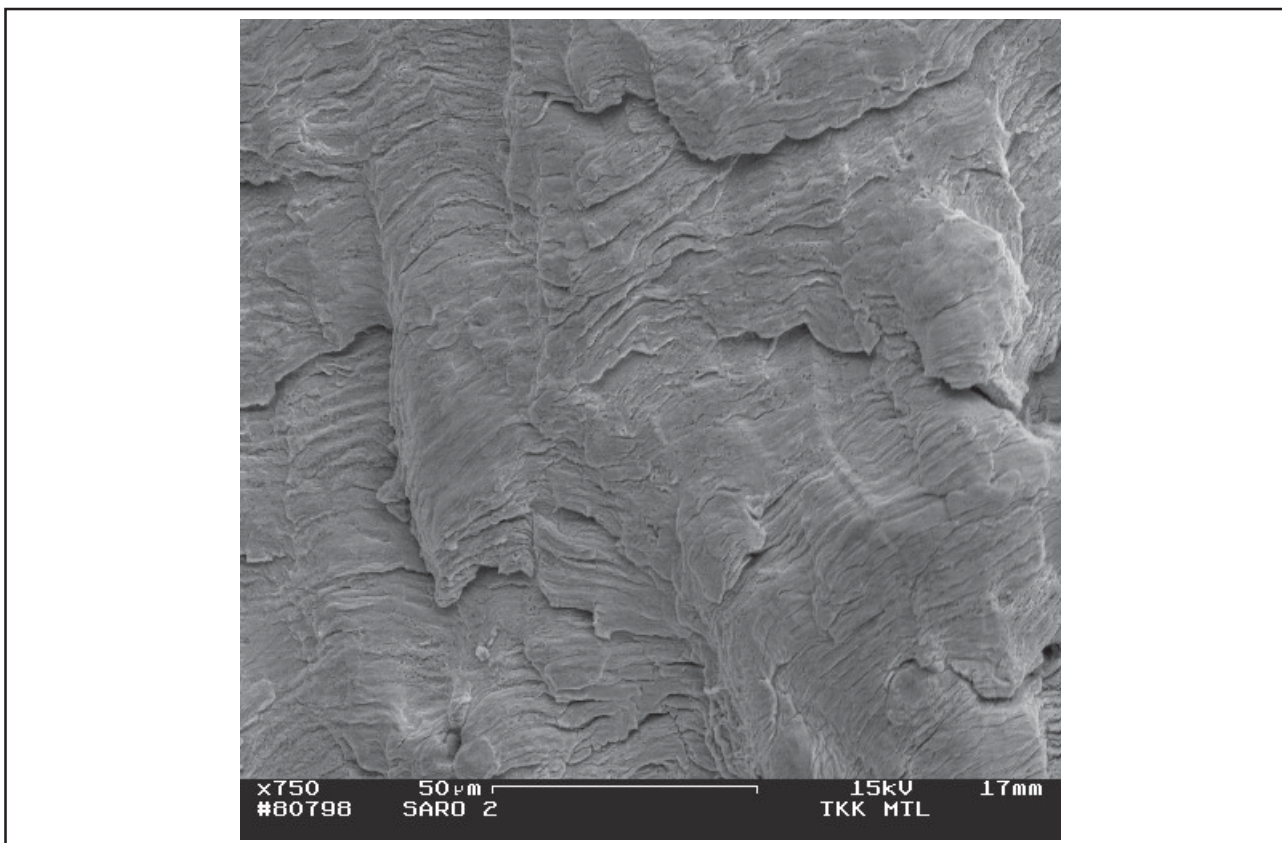
alasajettuna, jolloin lämpötila on alhaisempi kuin käytön aikana ja särön yli vaikuttavat jännitykset pienempiä. Särön yli vaikuttavalla jännityksellä on merkitystä särön avaamaan ja tätä kautta sen havaittavuuteen ultraäänellä. Puristusjännityksen kasvaessa särön avauma pienenee ja särö alkaa läpäistä ultraääntä. Edellinen pätee silloin, kun särö on puhdas, eli sisällä on pelkästään ilmaa. Tilanne muuttuu, kun särön sisällä on oksidia. Tällöin puristusjännityksen vaikutus säröstä saatavan kaiun korkeuteen pienenee huomattavasti johtuen osaltaan siitä, että särön kyljet eivät pääse puristumaan yhteen [22]. Mikäli taas särön sisällä on vettä, helpottaa se ultraäänien läpäisevyyttä [23, 24]. Tämän työn yhteydessä tehdyissä kokeissa kasvaneiden säröjen sisältämää oksidimäärää voidaan arvioida auki murrettuna särön 2 perusteella. Kuvassa 14 näkyvät tummat alueet ovat väsytyksen aikana muodostunutta oksidia. Huolimatta nopeasta särön kasvusta verrattuna käytössä syntyneiden säröjen kasvunopeuksiin, on särön sisälle ehtinyt muodostua oksidia. Oksidin muodostumiseen näin lyhyessä ajassa vaikuttavat todennäköisesti kokeissa saavutetut korkeat maksimilämpötilat.

Kokeissa kasvaneiden säröjen morfologia vastaa täysin käytössä syntyneiden säröjen morfologiaa, sisältäen sekundääristä särönkasvua (kuva 16), kärjen haarautumista (kuva 15) ja vastaavia särön leveyksiä kuin käytössä syntyneillä säröillä, vertaamalla taulukko XII ja taulukko II. Kuvassa 17 on särön 2 murtopinta kuvattuna SEM:llä. Särön leveyksiä arvioitaessa on otettava huomioon, että arvot on mitattu hieestä. Särön leveys kasvaa, kun se irrotetaan koekappaleesta ja siinä vaikuttavat puristusjännitykset pääsevät laukeamaan. Tämä ei kuitenkaan vaikuta tulosten vertailuun, koska vertailutulokset on myös mitattu hieestä [12]. Särön 2 leveys mitattuna hieestä on 180 µm, kun se oli ennen koekappaleen rikkomista otettuna jäljenteestä mitattuna 75 µm. Tästä nähdään, että särö aukeaa, kun se irrotetaan koekappaleesta.

Kokeellisen osuuden yhtenä tavoitteena oli valmistaa yksittäinen särö. Suoritetuilla kokeilla ei kuitenkaan saatu kasvamaan vain yhtä säröä, vaan kokeissa 1 ja 3 vähintään kolme säröä kasvoi samalle kuumennusalueelle. Kokeiden 1 ja 2 avulla pystyttiin osoittamaan, että säröt saadaan kasvamaan haluttuun suuntaan. Kokeilla pystyttiin



Kuva 16. Sekundääristä särönkasvua. Materiaali 08X18H10T. Väsytetty 6500 sykliä.



Kuva 17. Särön 2 murtopinta. Materiaali 08X18H10T. Väsytetty 6500 sykliä.

siis osoittamaan, että termisellä väsytyksellä on mahdollista tehdä ainakin yksittäisiä säröjä haluttuun suuntaan.

Käytettyä menetelmää voidaan soveltaa erikoisille ja muotoisille kappaleille, koska kela voidaan muotoilla väsyttävän pinnan mukaiseksi, mikä tekee sen laaja-alaisen käytön säröjen valmistuksessa mahdolliseksi. Kokeissa käytetyt ainepaksuudet olivat 8,5 mm ja 14,27 mm, ja syvimmäksi kasvanut särö oli 7,0 mm ja se tehtiin 8,5 mm paksuun aineeseen. Käytetyille ainepaksuuksille saadaan siis tehtyä riittävän syviä säröjä ääritapauksia ajatellen. Onnistuuko särön kasvattaminen syväksi silloin, kun käytetään huomattavasti paksumpia aineita, ja lämmön johtuminen on vaikeammin hallittavissa jää selvitettäväksi.

Kokeissa käytettiin korkeita lämpötiloja, jotta jännitykset olisivat riittävän suuria särön kasvattamiseksi. Huolimatta korkeista lämpötiloista ei koekappaleiden mikrorakenteessa tapahtunut rakenekasvua niin, että se häittäisi ultraäänitarkastusta. Kuvassa 18 on perusaineen raerakennetta kuumentamattomalta alueelta, ja kuvassa 19 kuumennetulta alueelta.

Säröjen pituus/syvyys-suhdetta tulisi pystyä muuttelamaan mahdollisimman laajoissa rajoissa, jotta särön valmistuksessa pystytään kattamaan kaikki käytännössä vastaan tulevat säröjen koot. Tällä varmistetaan myös se, että tarkastaja ei sokkotestissä voi särön pituuden perusteella päätellä sen syvyyttä. Kokeissa ei saatu kasvatettua pituus/syvyys-suhteeltaan erilaisia säröjä, joihin lähinnä käytettävissä olleen ajan vähydestä.

Kokeissa käytettyä termisen väsymisen laitteistoa ei ole aikaisemmin käytetty varsinaisesti säröjen valmistukseen, vaan käyttölämpötilojen jäljittelyyn. Käytössä ei näin ollen ollut myöskään mitään menetelmää tai laskentakaavaa, millä olisi voitu arvioida tietyillä parametreilla saatavaa säröä. Tämän työn yhteydessä suoritettujen kokeiden määrä oli niin pieni ja jokainen koe erilainen, että koeparametrien ja särön koon välille ei ollut mahdollista saada yhteyttä. Tällaisessa tapauksessa särön koon määrittäminen jää tehtäväksi NDT-menetelmillä, mikäli koekappaletta ei haluta rikkoa avoimen tai sokkotestin jälkeen. Säröjen pituuden ja syvyyden suhde näyttää noudattavan melko hyvin suhdetta, jossa särön syvyys on puo-

let särön pituudesta koekappaleen pinnassa, myös aikaisemmat kokemukset Teknillisen korkeakoulun Konetekniikan osaston Materiaaliopin laboratorion termisen väsymisen kokeista tukevat tätä käsitystä. Tällöin särön kasvua voidaan seurata ottamalla jäljenteitä. Niistä pystytään mittaamaan särön pituus pinnassa, mikäli koekappaleen pinnan laatu on niin hyvä, että siitä on mahdollista erottaa särö. Tämäkin tapa on kuitenkin likimääräinen. Mikäli taas koko joudutaan määrittelemään NDT-menetelmillä, on saatu tulos aina jossain määrin epätarkka, eikä särön todellista kokoa saada tarkasti selville muuten kuin rikkovalla aineenkoetuksella. Kokeissa käytetty menetelmä soveltuu erinomaisesti koekappaleiden valmistamiseen silloin, kun termisellä väsytyksellä kasvatetut säröt leikataan irti alkuperäisestä kappaleesta, koska tällöin saadaan selville särön todellinen koko. Tämän jälkeen leikatut säröt istutetaan päteväinnissä käytettävään koekappaleeseen.

8.5 Lisätutkimustarve

Kokeellisessa osuudessa ei pystytty tutkimaan kaikkia asetettuja tavoitteita riittävästi, johtuen rajallisista aikaresursseista. Kokeiden yhtenä tavoitteena oli saada yksittäinen särö kasvamaan niin, että muut kuumennetulle alueelle ydintyneet mikrosäröt eivät lähde kasvamaan. Tätä ei suoritettuilla kokeilla saavutettu. Kokeita lähdettiin tekemään niin, että koekappaleen pintaa kuumentettiin pieneltä alueelta pyrkimyksenä saada aikaiseksi yksi iso särö termiselle väsymiselle ominaisen säröverkon sijasta. Toinen mahdollisuus olisi ollut kuumentaa suurempi alue ja suorittaa jäähdytys pienelle alueelle. Tässä tapauksessa tulee kuumennuksen olla koko ajan päällä, jotta vältetään säröjen kasvamiselta koko alueelle. Edellä mainitussa tapauksessa jäähdytyksen tulisi toimia sykleittäin.

Kokeissa käytetty lämpötilan mittaus on riittämätön siinä tapauksessa, että kehitetään menetelmä, jolla pystytään arvioimaan saatavaa säröä väsyysparametrien perusteella. Tällöin tulisi lämpötilan mittauksen toimia reaaliajassa. Kokeissa käytetyt ainepaksuudet olivat pieniä, eikä näin ollen pystytä arvioimaan riittävätkö lämpötilan muutoksilla aikaansaadut jännitykset kasvattamaan säröä silloin, kun ainepaksuus on huo-

9 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Ydinvoimalaitoksilla suoritettavien NDT-tarkastusten tarkoituksena on löytää rakenteisiin mahdollisesti käytön aikana syntyneet viat, kuten säröt ja korroosion aiheuttamat vauriot. Kansainväliset rikkomattomien tarkastusmenetelmien luottavuustutkimukset ovat osoittaneet menetelmien suorituskvyssä puutteita. Tämä on johtanut tarkastusmenetelmien päteväntiin, jolla pyritään varmistamaan tarkastusmenetelmän ja sitä käyttävän henkilöstön suorituskvy. Pelkästään tarkastusmenetelmien päteväinnillä ei vielä saada varmuutta siitä, että kaikki viat löytyvät. Tarkastuskohteiden valinnalla ja tarkastusten laajuudella ja jaksotuksella on myös oleellinen merkitys sille, kuinka hyvin tarkastusten tarkoitus täyttyy. Ongelmana Suomessa on päteväntikäytännön puuttuminen, koska asia on niin uusi, ettei yhtään hyväksyttyä päteväntiä ole vielä suoritettu. Vaatimukset päteväntikoekappaleissa olevien vikojen ominaisuuksista sekä vikojen valmistaminen ovat myös päteväntin suurimpia ongelmia.

Tämän työn tavoitteena oli määrittellä NDT-tarkastusten päteväntin periaatteet sekä tarjota tietoa päteväntistä suomen kielellä, koska aikaisempia suomenkielisiä julkaisuja ei ole. Päteväntin periaatteita määriteltiin kirjallisuustutkimuksen perusteella. Siinä on esitetty NRWG:n ja ENIQ:n asiakirjojen näkemykset päteväntistä, sekä esitetty lyhyesti ASME:n päteväntivaatimukset ja vertailtu ASME:n ja NRWG:n suurimpia eroavaisuuksia. Asiat on esitetty niin, että niitä voidaan soveltaa kaikkiin rikkomattomiin tarkastusmenetelmiin. Yksityiskohtien selventämiseksi esimerkkinä on käytetty ultraäänitarkastusta. Kirjallisuustutkimuksessa on myös tutkittu käytössä syntyneiden säröjen ominaisuuksia, jotta saadaan tietoa päteväntikoekappaleissa olevien vikojen valinnalle. STUK:n päätöksen perusteella tarkastusmenetelmien pätevänti tullaan

Suomessa tekemään eurooppalaisen päteväntitavan mukaan, jolloin pätevänti on tapauskohtainen, eikä yleinen kuten ASME:n vaatima tapa. Eurooppalaisessa tavassa käytetyn menetelmän valinta perustellaan teknisissä perusteluissa ja käytännön kokeilla osoitetaan menetelmän ja henkilöstön suorituskvy vaadittavien vikojen havaitsemisessa ja määrittämisessä. Teknisissä perusteluissa määritellään kaikki tarkastusmenetelmän ja käytännön kokeissa käytettävien koekappaleiden olennaiset muuttujat ja tarvittaessa niiden sallittu vaihteluväli.

Päteväntin yksi tärkeimmistä asioista on koekappaleiden ja niissä olevien vikojen valmistus. Eurooppalainen päteväntitapa edellyttää todellisia tarkastuskohteita jäljittelevien koekappaleiden käyttämistä. Niissä käytetyt viat tulee perustella teknisissä perusteluissa. Tämän työn kokeellisessa osuudessa tutkittiin säröjen valmistamista termisellä väsytyksellä. Kyseistä laitteistoa ei ole aikaisemmin käytetty säröjen valmistukseen, vaan käyttölämpötilojen jäljittelemiseen materiaalien termisen väsymisen kestävyuden määrittämiseksi. Tavoitteena oli selvittää voidaanko kyseisellä laitteistolla valmistettuja säröjä käyttää päteväntikoekappaleissa ja voidaanko niillä mahdollisesti simuloida myös muita särötyyppejä. Kokeissa saatiin kasvamaan säröjä, joiden ominaisuudet vastaavat niin hyvin käytössä syntyneiden säröjen ominaisuuksia, että niitä voidaan käyttää päteväntikoekappaleissa. Kokeilla pystyttiin myös osoittamaan, että kyseisellä menetelmällä valmistettuja säröjä voidaan käyttää tietyin rajoituksin myös muiden särötyyppien simulointiin. Kokeissa saatiin kasvatettua yksittäisiä säröjä termiselle väsymiselle ominaisen säröverkon sijaan ja säröjen suuntautuneisuutta pystyttiin muuttamaan hallitusti. Valmistetuille säröille suoritettut ultraäänitarkastukset osoittivat, että

säröt tarjoavat tarkastusmenetelmälle todellisuutta vastaavan haasteen ainakin koon määrittämissä.

Suomessa käyttöön otettava päteväntoimintatyyli perustuu NRWG:n asiakirjan näkemyksiin jo pelkästään sen takia, että STUK on asettanut sen päteväntoiminnan vähimmäisvaatimustasoksi. Kaikkia siinä esitettyjä näkemyksiä ei kuitenkaan voida toteuttaa sellaisenaan Suomessa. Rajoituksia aiheuttaa ainakin NDT-asiiantuntijoiden rajallinen määrä Suomessa, jolloin niitä ei riitä kaikkiin päteväntoimintajärjestöjen elimiin. Samoien asiiantuntijoiden käyttö päteväntoimintajärjestöjen eri elimissä niin, että ne ovat hyväksymässä tekemiään ehdotuksia, asettaa koko järjestelmän luotettavuuden kyseenalaiseksi. Suomen vähäisestä asiiantuntijoiden ja ydinvoimalaitosten määrästä johtuu, että valmiit kansainväliset päteväntoimintatyyli eivät sellaisenaan sovellu otettavaksi käyttöön Suomessa, vaan ne edellyttävät yksityiskohtien muuttamista Suomen oloihin sopiviksi. Päteväntoiminnassa keskeisimpiä periaatteita on käy-

tännön kokeissa käytettävien koekappaleiden ja niissä olevien vikojen edustavuus. Käyttämällä koekappaleissa mahdollisimman hyvin todellisia vikoja vastaavia vikoja, saadaan varmistus sille, voidaanko käyttämällä kyseistä tarkastusmenetelmää havaita ja/tai määrittää vaaditut viat vaaditulla tarkkuudella. Henkilöstön päteväntoimintaksi suoritettavilla käytännön kokeilla nähdään, onko tarkastaja kykenevä havaitsemaan/määrittämään vaaditut viat. Tarkastusten suorituskyvyn varmistamiseksi käytännössä tulee valvoa, että tarkastukset suoritetaan tarkastusohjeen mukaan.

Päteväntoimintakäytännöstä ei saisi tulla niin jäykkää ja hankalaa toteuttaa, että se johtaa tarkastuksissa käytettävien tekniikoiden teknisen kehityksen pysähtymiseen, koska se ei ole kenenkään etujen mukaista. Kehityksen pysähtyminen on mahdollista, mikäli tarkastusmenetelmien päteväntoiminnasta tulee niin hankala ja kallis toteuttaa, että käytetään mieluummin vanhoja jo päteväntoimintatyyliä menetelmiä kuin että päteväntoimintatyyliä uusien ja parempien tekniikoiden.

VIITTEET

1. Ohje YVL 3.8: Ydinvoimalaitosten paineastiat, Määräaikaistarkastukset. Toinen painos, Helsinki. Säteilyturvakeskus, 1993. 13 s. ISBN 951-47-8454-5
2. ASME Code, Section XI, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, 1995 edition. American Society of Mechanical Engineers. New York, 1995.
3. Engl, G, Borloo, E. Proceedings of the International Workshop on the Contribution of PISC to Codes and Standards, in Particular to Performance Demonstration. PISC III Report no. 29, OECD-CEC 1993. 228 s. EUR 15334 EN.
4. NRWG: The Nuclear Regulators Working Group. Common position of European regulators on qualification of NDT-systems for pre- and in-service inspection of light water reactor components. European Commission, 1997. 40 s. EUR 16802 EN. ISBN 92-827-9625-6
5. SFS EN 473: NDT-henkilöiden pätevänti ja sertifiointi. Yleisperiaatteet. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki, 1993. 27 s.
6. ENIQ: European Network for Inspection Qualification. European methodology for qualification. ENIQ report no. 2. 1997. 34 s. EUR 17299 EN.
7. Worrall, G.M., Conroy, P.J., Whittle, M.J., Roscoe, P., A Review of the Information Required by Technical Justifications and its Availability. SKI Report 97:11, 1997. 34 s. ISSN 1104-1374
8. Recommended format for a technical justification. ENIQ draft. ENIQ. TJ(98)5. (julkaisematon)
9. Lipponen, A., Muokattujen austeniittisten putkien hitsausliitosten ultraäänitarkastuksen luotettavuus. Säteilyturvakeskus. STUK-YTO-TR 117. Helsinki 1996. 51 s. ISBN 951-712-156-3
10. Recommended Practice: Influential/Essential/Fixed Parameters. ENIQ Pilot Study document ENIQ. PILOT(98)1. 10 s. (julkaisematon)
11. Särkiniemi, P., Kauppinen, P., Tarvainen, R., Sillanpää, J. Ultraäänilaitteiston ominaisuuksien määrittäminen. Säteilyturvakeskus. STUK-YTO-TR 31. Helsinki 1991. 52 s. ISBN 951-47-5484-0
12. Ekström, P., Wåle, J., Crack Characterisation for In-service Inspection Planning. SKI Report 95:70, 1995. 84 s. ISSN 1104-1374
13. Hakala, J., Hänninen, H., Aaltonen, P., Stress corrosion and thermal fatigue—experiences and countermeasures in austenitic ss pipings of Finnish BWR-plants. Nuclear Engineering and Design, 1990. Vol. 119, ss.389-398. ISSN 0029-5493
14. Hänninen, H., Murtumat korroosioilmiönä, jännityskorroosiomurtumien syyt. Savon korroosiopäivät 1988, Konsertti- ja kongressitalo Mikkeli, 8.-9.9.1988.

15. Aho-Mantila, I., Hänninen, H., Raeraja-jännityskorroosiosäröjen kasvu kiehutusvesi-reaktoreiden austeniittisissa ruostumattomissa teräsputkistoissa. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tiedotteita 643. Espoo 1986. 67 s. ISBN 951-38-2748-8.
16. Fontana, M. G., Corrosion Engineering. 3rd ed. Ohio, USA. McGraw-Hill, Inc., 1986. 556 s. ISBN 0-07-021463-8.
17. Andresen, P. L., Irradiation-Assisted Stress-Corrosion Cracking. Teoksessa: Jones, R. H. (toim.). Stress-Corrosion Cracking. Ohio, USA: ASM International, 1992. ss. 181–210. ISBN 0-87170-441-2.
18. Kauppinen, P., Reliability of non-destructive inspections. RATU2, The Finnish Research Programme on the Structural Integrity of Nuclear Power Plants. VTT, Research notes 1843. Espoo 1997. ss. 93–102. ISBN 951-38-5129-X.
19. Valkeajärvi, O., Käynti Southwest Research Institutessa, San Antoniossa, Texasissa 9.–12.7.1996. Matkakertomus. Helsinki, 25.7.1996. (julkaisematon)
20. Kemppainen, M., Termisen Väsymisen Testausjärjestelmän Suunnittelu ja Toteutus. Diplomityö. TKK, Espoo. 1997. 110 s.
21. Martikainen, J., Hitsausliitoksen NDT-tarkastuksen luotettavuus. Lisensiaattityö. LTKK, Lappeenranta. 1984. 135 s.
22. Iida, K., Naruse, A. ja Takumi, K. Influence of Stress Condition on Flaw Detectability and Sizing Accuracy by Ultrasonic Inspection. Teoksessa: toim. Kunihiro Ida, Doherty, James E. ja Edelmann, X. 9th International Conference on Nondestructive Evaluation in the Nuclear Industry. Tokio, Japan. 25.–28.4.1988. USA, ASM International, 1988. ss. 563–567. ISBN 0-87170-345-9.
23. Krautkrämer, J., Krautkrämer, H. Ultrasonic Testing of Materials. 4th ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1990. 677 s. ISBN 0-387-51231-4.
24. Särkiniemi, P., Kauppinen, P. ja Jeskanen, H. Jännityskorroosiosäröjen Ultraäänitutkimus. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, tiedotteita 703. Espoo, 1987. 49 s. ISBN 951-38-2869-7.

Yhteenveto
Yhteenveto siitä kuinka hyvin kappaleessa 2 asetettujen tavoitteiden saavuttaminen on teknisissä perusteluissa esitetty.
1. Johdanto
2. Lähtötiedot
Tärkeimmät yksityiskohdat seuraavista asioista: tarkastuskohde, viat, tarkastusmenetelmä ja tarkastukselta vaadittu suorituskyky.
3. NDT-järjestelmä
Kuvaus käytetystä tarkastusmenetelmästä; tekniikka, tarkastusohje, laitteisto ja henkilöstö.
4. Vaikuttavien muuttujien analyysi ja henkilöstölle asetettavat vaatimukset
Vaikuttavien muuttujien analyysi lähtötietojen, menetelmän ja laitteiston olennaisten muuttujien tunnistamiseksi. Katsaus henkilöstölle asetettavista vaatimuksista.
5. Fysikaalinen päättely
Kvalitatiiviset perustelut tarkastusohjeen ja -laitteiston parametrien valinnalle tarkastuskohteen ja määritettävien vikojen suhteen (vertailukohtana kappaleessa 4 määritellyt muuttujat).
6. Mallintaminen
Mallintamisen käyttäminen vioista saatavan vastineen ennustamisessa ja osoittaa, että vaadittava suorituskyky havaittavuuden kannalta saavutetaan. Edellyttää vikojen sijainnin ja suuntautuneisuuden huomioon ottamista. Pätevöitettyjä malleja epähomogeenisille anisotrooppisille materiaaleille ei vielä ole, mutta ferriittisille teräksille tarkoitettuja voidaan käyttää ohjeena. Tästä johtuen käytännön kokeet tulevat olemaan paras tapa todistaa vikojen havaittavuus austeniittisissa materiaaleissa.
7. Materiaalin rakenteen vaikutus
Tarvitaan yleensä vain epähomogeenisten anisotrooppisten aineiden tapauksessa, kuten austeniittiset hitsit. Edustavien koekappaleiden mittaukset raerakenteen määrittämiseksi, jotta voidaan ennustaa ultraäänien kulku kappaleen läpi valittuja luotaimia käytettäessä. Havainnollistaa, että tarkastettava alue tulee kokonaan katetuksi.
8. Kokeelliset tulokset
Sisältää tuloksia monilaboratoriokokeista kuten PISC, mitkä tukevat valittua menetelmää. Tuloksia laboratorioskokeista, jotka on tehty joko edustavilla tai yksinkertaistetuilla koekappaleilla. Tuloksia aikaisemmista pätevinneistä sekä kenttäkokemuksista.
9. Parametritutkimukset
Sellaisten kappaleessa 4 määriteltyjen muuttujien tutkiminen, joita ei ole käyty läpi kappaleissa 6 ja 7. Tässä voidaan viitata aikaisempaan työhön tai juuri kyseisellä koekappaleella tehtyihin kokeisiin.
10. Laitteiston ja softwarin analyysi
Laitteiston valintaa tukevat todisteet viittauksena kappaleessa 4 tehtyyn analyysiin. Tarkastustiedon arviointiin ja esittämiseen valitun softwarin valintaa tukevat todisteet. Tässä tulisi esittää myös perustelut tiedon tulkitsemiseen käytetyille arviointi/analyysi kaavioille.
11. Yhteenveto esitetyistä perusteluista asetettujen tavoitteiden saavuttamiseksi
Yhteenveto aikaisemmissa kappaleissa esitetyistä perusteluista tavoitteiden saavuttamiseksi havaitsemisen ja koon määrittämisen kannalta ottamalla huomioon määritellyt olennaiset/pysyvät muuttujat. Perustelut, viittauksena asiaankuuluviin aikaisempiin kappaleisiin, ehdotetulle henkilöstön harjoittelu ja pätevynti järjestelyille.
12. Käytännön kokeiden koekappaleiden lähtötiedot
<ul style="list-style-type: none"> • Ohjeita käytännön kokeissa käytettäville koekappaleille. Edellisissä kappaleissa suositellut rakenteet ja viat, erityisesti ne jotka kappaleessa 2 esitetyistä asettavat tarkastusmenetelmälle suurimmat haasteet. • Tarkastusohjeeseen mahdollisesti tarvittavat muutokset suorituskyvyn saattamiseksi vaaditulle tasolle. • Ohjeita pätevyntielimelle vioista, koekappaleista ja luoksepäästävyyydestä koskien sokkotestejä. • Mikäli koekappaleet tarvitaan heti pätevyntin alussa, lähtötiedot voivat perustua fysikaaliseen päättelyyn, mikä on yleensä käytettävissä teknisten perusteluiden laadintaa aloitettaessa. • Pätevyntielimen järjestämien avointen kokeiden tuloksia voidaan joissain tapauksissa käyttää teknisissä perusteluissa.
13. Johtopäätökset ja suositukset

KOKEIDEN MITTAUSPÖYTÄKIRJAT

LIITE 5

MITTAUSPÖYTÄKIRJA				
TERMINEN VÄSYMINEN (versio 1.8)				pvm: 9.4.1998
Kokeen suorittaja:	Mika Kemppainen			
Koemateriaali:	08X18H10T/IVO; K.Elfvingin DI-työ kokeet			
Koekappale:				
Ajettu syklejä:	0	sykliä		
Lämpötila vaihtelu:	10 °C- 500-600 °C	pakotettu jäähditys=>kuumennuskuvion rajaus		
Raja-arvo:	V			
Pyrometri:	Maurer / Mikron			
Kuumentimen teho:	90 %	44,5 %	(jännite / virta)	
Jäähdytys:	ilma / vesi			
	jäähdytyshanan asento: _____°			
aika:	30 s	Kuumennusaika:	30 s	
Feston ohjelma nro:	3 / 4			
Suuttimet:	kyllä / ei			
Suuttimien putket:	pitkät / lyhyet			
Kellonaika	Sykliä	Huomioit	Kokonais-syklimäärä	Kuvattu (s=SEM o=optinen)
17.20	0	90 ok		
	192	stop		
22.30	195	start, 288 ok, 1055 ok, 2374 ok, 4067 ok, 5712 ok		
14.4 klo 9.00	6500	stop		
		2(3?) säröä		
		putken aksiaalisuunnassa 7 mm, 11 mm, (4 mm)		

LIITE 5

KOKEIDEN MITTAUSPÖYTÄKIRJAT

MITTAUSPÖYTÄKIRJA					
TERMINEN VÄSYMINEN (versio 1.8)			pvm: 14.4.1998		
Kokeen suorittaja:	Mke				
Koemateriaali:	IVO:n putki/K.Elfvingin DI-työ				
Koekappale:					
Ajettu syklejä:	0	sykliä	Kela aksiaalisuunnassa		
Lämpötila vaihtelu: 10 °C- 700 °C					
Raja-arvo:	V				
Pyrometri:	Maurer / Mikron				
Kuumentimen teho:	90 %	44 %	(jännite / virta)		
Jäähdytys:					
	ilma / vesi				
	jäähdytyshanan asento: vähän auki				
aika:	23 s	Kuumennusaika:		11 s	
Feston ohjelma nro:	3 / 4				
Suuttimet: kyllä / ei					
Suuttimien putket: pitkät / lyhyet					
Kellonaika	Syklit	Huomiot	Kokonais- syklimäärä	Kuvattu (s=SEM o=optinen)	
20.35	0				
	1222				
15.4 klo 17.00	1224	start (rajaksi 2500 s.)			
		AE:stuk3.dat			
		1293 ok			
	2500	autostop			
16.4 klo 20.10	0	raja 1500 AE: stuk4.dat AE pysäyt. 17.4 klo 9.00			
	173	stop:jäähd.laite ylikuumeni			

KOKEIDEN MITTAUSPÖYTÄKIRJAT

LIITE 5

MITTAUSPÖYTÄKIRJA				
TERMINEN VÄSYMINEN (versio 1.8)			pvm:	20.4.1998
Kokeen suorittaja:	Mke			
Koemateriaali:	K.Elfvingin DI-kokeet			
Koekappale:				
Ajettu syklejä:	0	sykliä	Kela putken pituus-suuntaan	
Lämpötila vaihtelu:	10 °C-	700 °C	Keskestä juuri ja juuri	
Raja-arvo:	V			punahehk.
Pyrometri:	Maurer / Mikron			
Kuumentimen teho:	90 %	44 %	(jännite / virta)	
Jäähdytys:	ilma / vesi			
	jäähdytyshanan asento:			vähän auki
aika:	14,5 s	Kuumennusaika:	5,0 s	
Feston ohjelma nro:	3 / 4			
Suuttimet:	kyllä / ei			
Suuttimien putket:	pitkät / lyhyet			
Kellonaika	Syklit	Huomiot	Kokonais- syklimäärä	Kuvattu (s=SEM o=optinen)
14.45	0			AE:stuk5.dat
20.55	1100	stop		
22.00	1100	start		
21.4 klo 8.40	3000	stop		

LIITE 5

KOKEIDEN MITTAUSPÖYTÄKIRJAT

MITTAUSPÖYTÄKIRJA						
TERMINEN VÄSYMINEEN (versio 1.8)					pvm:	28.4.1998
Kokeen suorittaja:		Mke				
Koemateriaali:		K.Elfvingin DI-kokeet				
Koekappale:						
Ajettu syklejä:		0	sykliä		Lyhyt kela	
Lämpötila vaihtelu:		0 °C- n.500	°C		Kuumennus ed alueen	
Raja-arvo:		V			viereen, kasvaako	
Pyrometri:		Maurer / Mikron			pitkä särö?	
Kuumentimen teho:		90 %	44 %	(jännite / virta)		
Jäähdytys:		ilma / vesi				
		jäähdytyshanan asento:		hiukan auki		
aika:		14,5 s		Kuumennusaika:	10 s	
Feston ohjelma nro:		3 / 4				
Suuttimet:		kyllä / ei				
Suuttimien putket:		pitkät / lyhyet				
Kellonaika	Syklit	Huomiot			Kokonais- syklimäärä	Kuvattu (s=SEM o=optinen)
18.15	0	140 ok, 500 ok				
29.4. klo 8.20	2012	stop				

MITTAUSPÖYTÄKIRJA							
TERMINEN VÄSYMINEN (versio 1.8)					pvm:	29.4.1998	
Kokeen suorittaja:	Mke						
Koemateriaali:	K.Elfvingin DI-kokeet: hitsi I						
Koekappale:	TVO						
Ajettu syklejä:	0				sykliä		
Lämpötila vaihtelu:	0 °C-	750 °C			punahehk.		
Raja-arvo:	V						
Pyrometri:	Maurer / Mikron						
Kuumentimen teho:	90 %	45 %			(jännite / virta)		
Jäähdytys:	ilma / vesi						
	jäähdytyshanan asento: _____ °						
	aika:	14,5 s			Kuumennusaika:	6 s	
Feston ohjelma nro:	3 / 4						
Suuttimet:	kyllä / ei						
Suuttimien putket:	pitkät / lyhyet						
Kellonaika	Syklit	Huomiot			Kokonais- syklimäärä	Kuvattu (s=SEM o=optinen)	
17.25	0	95 ok					
	2770	stop					

LIITE 5

KOKEIDEN MITTAUSPÖYTÄKIRJAT

MITTAUSPÖYTÄKIRJA						
TERMINEN VÄSYMINEN (versio 1.8)					pvm:	30.4.1998
Kokeen suorittaja:	Mke					
Koemateriaali:	K.Elfving DI-kokeet: hitsi II					
Koekappale:						
Ajettu syklejä:	0	sykliä				
Lämpötila vaihtelu:	10 °C-	n.700	°C			
Raja-arvo:	V					
Pyrometri:	Maurer / Mikron					
Kuumentimen teho:	90 %	47 %	(jännite / virta)			
Jäähdytys:	ilma / vesi					
	jäähdytyshanan asento:				hiukan auki	
aika:	10 s	Kuumennusaika:			6,0 s	
Feston ohjelma nro:	3 / 4					
Suuttimet:	kyllä / ei					
Suuttimien putket:	pitkät / lyhyet					
Kellonaika	Sykliä	Huomiot	Kokonais- syklimäärä	Kuvattu (s=SEM o=optinen)		
18.20	0	240 ok, 1070 ok				
		3755 ok => kela ei kuumenna enää yhtä punahehk.				
		pidensin kuumennusaikaa 1 sekunnilla				
1.5 klo 22.45		5960 ok => siirsin kelan lähemmäksi pintaa => kuumenee				
		enemmän				
		(silmämäär. tarkastus: ei mitään				
		8820 ok, 11180 ok, 13225 ok 37 °C kopissa				
		14458 ok, 37,8 °C kopissa				
		15600 ok				
4.5 klo 9.05	17803	stop				