

# Jatkuvan monitoroinnin menetelmät rakenteiden eheyden varmistamiseen ydinvoimaloissa

Matti Sarkimo

VTT Valmistustekniikka



ISBN 951-38-5182-6  
ISSN 1235-0605  
Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1998

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Valmistustekniikka, Ydinvoimalaitosten materiaalitekniikka, Kemistintie 3, PL 1704, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7002

VTT Tillverkningssteknik, Material och strukturell integritet, Kemistvägen 3, PB 1704, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7002

VTT Manufacturing Technology, Materials and Structural Integrity, Kemistintie 3, P.O.Box 1704,  
FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 7002

Toimitus Leena Ukskoski

LIBELLA PAINOPALVELU OY, ESPOO 1998

Sarkimo, Matti. Jatkuvan monitoroinnin menetelmät rakenteiden eheyden varmistamiseen ydinvoimaloissa [Continuous monitoring methods for assessment of structural integrity in nuclear power plants]. Espoo 1998, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1882. 41 s.

**UDK** 620.179.1:534.6:621.311.25:621.039

**Avainsanat** nuclear power plants, automatic monitoring, nondestructive testing, condition monitoring, cracking (fracturing), acoustic emission, ultrasonic tests

## Tiivistelmä

Raportti on kirjallisuudesta kerättyihin tietoihin perustuva selvitys jatkuvaluonteiseen monitorointiin käytettävistä menetelmistä silmällä pitäen etupäässä ydinvoimalaitosympäristöä. Mukaan on lisäksi otettu joitakin tekniikoita, joiden käyttö rakenteiden eheyden jatkuvaan monitorointiin on mahdollista, vaikka käytännön sovelluksia ei ainakaan laajemmin ole toteutettu. Tarkastelu on tehty lähinnä rikkomattomien testaustekniikoiden (NDT) näkökulmasta, mutta eräät menetelmät voitaneen toisaalta katsoa kuuluviksi perinteisen kunnonvalvonnan alueeseen. Sen sijaan vesikemian monitorointiin liittyvää laajaa kokonaisuutta ei ole sisällytetty tähän raporttiin.

Akustiseen emissioon perustuville sovelluksille on annettu huomattavan suuri osuus, koska niiden on katsottu sopivan hyvin jatkuvan monitoroinnin periaatteella sovellettaviksi. Akustiseen emissioon perustuvat irto-osien ja vuotojen valvontajärjestelmät ovat kehittyneet myös sovelluksiksi, joita on otettu käyttöön eri ydinvoimalaitoksilla.

Raportissa käsitellään lisäksi NDT-alueella laajasti käytettävien ultraäänitekniikan ja sähkömagneettisten menetelmien soveltamista särönkasvun reaaliaikaiseen seurantaan. Värähtelymittausten käyttöä tarkastellaan lähinnä pyörivien koneiden ja ydinvoimaloiden erikoisovellusten kannalta. Lisäksi tarkastellaan kuormitusten ja väsymisen monitorointimahdollisuuksia sekä sivutaan lyhyesti materiaaliominaisuuksien mittausta jatkuvan monitoroinnin näkökulmasta.

Sarkimo, Matti. Jatkuvan monitoroinnin menetelmät rakenteiden eheyden varmistamiseen ydinvoimaloissa [Continuous monitoring methods for assessment of structural integrity in nuclear power plants]. Espoo 1998, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1882. 41 p.

**UDC** 620.179.1:534.6:621.311.25:621.039

**Keywords** nuclear power plants, automatic monitoring, nondestructive testing, condition monitoring, cracking (fracturing), acoustic emission, ultrasonic tests

## **Abstract**

This report is a review of the frequently used continuous monitoring methods that are applied or can possibly be applied in nuclear power plants. The methods covered include condition monitoring and non-destructive testing (NDT) techniques that can be used to detect flaws in components and the malfunction of machinery. The specific techniques for water chemistry monitoring are not covered by this report.

The systems based on acoustic emission are considered to be suitable for continuous monitoring applications and these are discussed in greater detail compared to other methods. The loose parts monitoring and leak detection systems based on acoustic emission have practical applications in several nuclear power plants.

The real-time monitoring of crack-tip movement using the ultrasonic method is also discussed. Some results are also referred to from the research and development work to monitor crack initiation and growth on the surface of high-speed rotating components using the electromagnetic method. Vibration measurements and analysis are mentioned as a usual tool for monitoring the condition of rotating machinery but also some special aspects of nuclear power plants are included. Finally the on-line fatigue and integrity monitoring systems are briefly discussed and given some considerations regarding the material property measurements using continuous non-destructive methods.

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	4
1. Johdanto	6
2. Akustisen emission sovellukset	8
2.1 Irto-osien monitorointi	8
2.2 Vuotojen monitorointi	11
2.3 Akustinen emissio	14
2.3.1 Akustinen emissiotestaus	14
2.3.2 Jatkuvaan monitorointiin perustuva AE-testaus	17
3. Jatkuva ultraäänimonitorointi	21
4. Sähkömagneettiset menetelmät	23
5. Värähtelymittaukset	28
6. Kuormitusten ja venymien monitorointi	31
7. Materiaaliominaisuuksien monitorointi	33
8. Yhteenveto	36
Lähdeluettelo	38

# 1. Johdanto

Tässä raportissa käsitellään kirjallisuustietoihin pohjautuen jatkuvan monitoroinnin periaatteella toimivia menetelmiä, joita on kehitetty erilaisten rakenteiden eheyden valvontaan. Monet näistä menetelmistä ovat käytössä tai soveltuvat käytettäväksi sekä konventionaalisilla että ydinvoimalaitoksilla. Ydinvoimalaitoksissa käytetään useita jatkuvasti toiminnassa olevia monitorointi- ja mittausjärjestelmiä, joilla seurataan laitoksen käyttäytymistä ja prosessien tilaa, mutta toistaiseksi on käytössä vain suhteellisen harvoja järjestelmiä, jotka indikoivat suoraan laitteiden ja rakenteiden eheyttä tai toimintakuntoa. Suurten, pyörivien koneiden värähtelyvalvonta voidaan mainita esimerkkinä sovelluksista, jotka ovat yleisesti käytössä ja vakiintuneet rutiininomaiseksi toiminnaksi.

Nykyaikaisten anturitekniikoiden ja tiedonkeräyslaitteiden avulla voidaan jo nyt toteuttaa automaattisia järjestelmiä, jotka soveltuvat jatkuvaan monitorointiin. Useimmat ydinvoimaloissa tehtävät, rakenteiden eheyteen kohdistuvat tarkastukset ajoitetaan käytännössä seisokkien yhteyteen, mutta käyttämällä jatkuvatoimisia järjestelmiä olisi mahdollista saada tietoa koko käyttöjakson ajalta. Sen lisäksi, että voidaan välittömästi havaita ilmenevät ongelmat ja vaaratilanteet, kyettäisiin varsinaisia tarkastuksia suuntaamaan tehokkaammin oikeisiin kohteisiin lyhyenä seisokkiaikana. Jos jatkuvaan monitorointiin tarkoitetut järjestelmät tuottavat riittävän luotettavaa tietoa, voidaan mahdollisesti karsia tarpeettomaksi katsottavia tarkastuksia. Näiden seikkojen pohjalta olisi mahdollista parantaa turvallisuutta ja mahdollisesti pienentää tarkastuskustannuksia.

Perinteisten rikkomattomien menetelmien (NDT) soveltaminen jatkuvaan monitorointiin on toistaiseksi harvinaista sekä ydinvoimalaitoksilla että muilla voimalaitoksilla ja prosessiteollisuudessa. Yleisimmin näitä menetelmiä käytetään valmistavassa teollisuudessa, jossa tuotetaan suuria määriä muodoiltaan yksinkertaista tuotetta, jolle asetetaan korkeat laatuvaatimukset. Tyypillisiä sovelluksia ovat esimerkiksi putkien valmistuksessa tuotantolinjoilla tehtävät pyörrevirta- ja ultraäänitarkastukset. Voimalaitosten ja prosessiteollisuuden kriittisten rakenteiden valvonta perustuu pääasiassa suunnitelmallisiin määräaikaisiin tarkastusohjelmiin. Viime aikoina on kuitenkin syntynyt sellaisia käsitteitä kuin älykkäät materiaalit ja älykkäät rakenteet, joihin on liitetty instrumentointia niiden sisäisen tilan ja kunnon valvomiseksi. Esimerkiksi siltojen ja lentokonerakenteiden toimintakunnon ja eheyden seuraamiseksi on kokeiltu ja kehitetty normaalin käyttötilanteen aikaista monitorointia akustisella emissiolla (Sison et al. 1996) ja (O'Brien 1996).

Tärkeä peruste jatkuvatoimiseen monitorointiin on mahdollisuus havaita heti yllättävät ja nopeasti pahenevat ongelmatilanteet. Näin voidaan rajoittaa äkillisten ja itseään kiihdyttävien tapahtumien seurauksena syntyvien vaurioiden laajuutta. Esimerkiksi vuodon

nopean ja luotettavan havaitsemisen, paikantamisen ja suuruuden arvioinnin perusteella voidaan nopeasti tehdä oikeita johtopäätöksiä tapahtuman vakavuudesta ja merkityksestä. Saadun tiedon avulla kyetään ohjaamaan toimintoja järkevästi ja samalla jo valmistelemaan tulevia korjaustoimenpiteitä.

Kiinteällä instrumentoinnilla voidaan myös pienentää virhelähteiden määrää verrattuna toistuviin mittauksiin, jotka tehdään manuaalisesti tai joissa anturit asennetaan joka kerta uudelleen. Tällä on merkitystä erityisesti silloin, kun mitataan ilmiöitä, joissa mittausarvojen muutokset ovat vähäisiä ja hyvin vaikeasti havaittavia. Jatkuvaa monitorointia tehtäessä voidaan tulokset myös sitoa muihin laitoksen prosessissa tapahtuviin muutoksiin esimerkiksi vallitseviin lämpötilan ja paineen arvoihin. Näin paranevat mahdollisuudet selvittää syitä, jotka aiheuttavat vaurioita tai ongelmia laitteiden toiminnassa.

Ilmeisesti tärkeimpiä rajoittavia tekijöitä NDT-tekniikoiden vähäiseen soveltamiseen jatkuvaan monitorointiin on vaikeus saavuttaa käytännön kannalta riittävää kattavuutta. Tietyissä kohdassa rakennetta sijaitseva NDT-anturi antaa normaalisti kuvan vain hyvin pienestä osasta rakennetta ja vaatimattomankin kattavuuden saaminen vaatisi runsaasti kallista instrumentointia. Tietyn todetun vian valvonnassa voidaan monitorointi rajata suppeammalle alueelle ja sen toteuttaminen saattaisi olla mahdollista kohtuullisin kustannuksin.

Akustisen emission hyväksikäyttöön perustavat menetelmät näyttäisivät soveltuvan muita NDT-menetelmiä paremmin jatkuvaan monitorointiin. Niiden kattavuus on monissa tapauksissa poikkeuksellisen laaja, jolloin muutamien antureiden avulla voidaan monitoroida suuriakin rakenteita. Niiden soveltaminen jatkuvaan monitorointiin on suhteellisen yksinkertaista, koska mittausmenetelmä on passiivinen ja laitteistot toimivat lähes kaikissa sovelluksissa automaattiseen mittaustulosten keräykseen perustuen.

Voimalaitosten monitoroinnissa muodostavat oman laajan kokonaisuutensa ne menetelmät, joita käytetään vesikemian seuraamiseen ja säätämiseen. Tämä monitorointi on monin tavoin erittäin tärkeää rakenteiden eheyden kannalta. Nykyisenä pyrkimyksenä on päästä yhä suurempaan ja reaaliaikaiseen mittausten toteutukseen. Esimerkkeinä viimeaikaisista korkean lämpötilan vesikemian sovelluksista voidaan mainita seuraavat julkaisut: Ehrnstén et al. (1996) ja Mäkelä et al. (1996). Aihepiiri on kuitenkin erittäin laaja ja siinä määrin erillinen alue, että sitä ei ole sisällytetty tähän esitykseen.

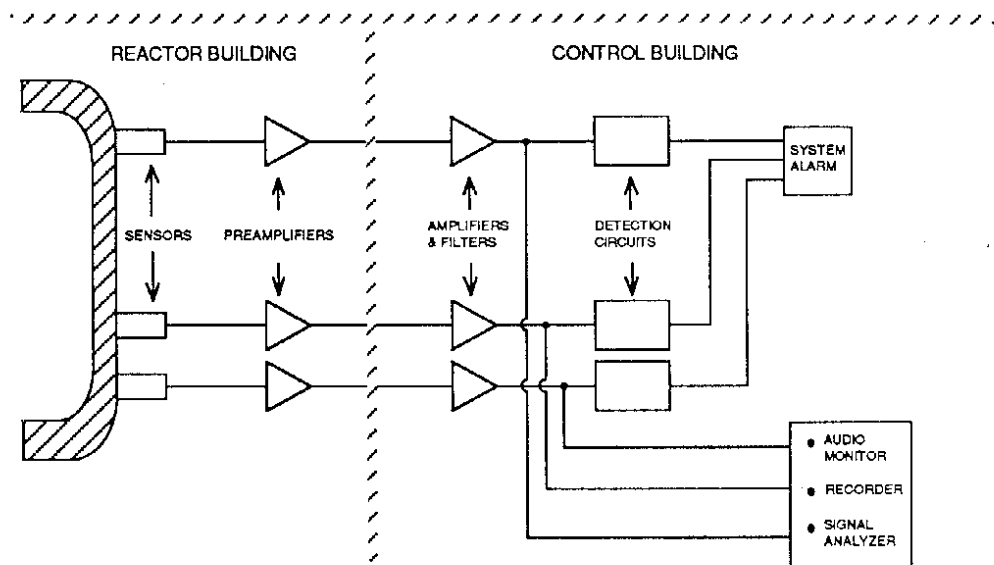
## 2. Akustisen emission sovellukset

Melko kehittyneen kokonaisuuden jatkuvatoimisen monitoroinnin alueella muodostavat passiivisesti akustisia signaaleja havainnoivat ja mittaavat järjestelmät, jotka voidaan katsoa akustisen emission (AE) sovelluksiksi. Periaatteena on havaita herkillä antureilla hälyttävien ilmiöiden synnyttämä ja rakenteessa eri aaltomuotoina etenevä energia. Käytännössä hyödynnetään näiden värähtelyjen mittaamiseen tiettyä taajuusalueita, joka sijoittuu sovelluksesta riippuen jollekin kohtaan välillä 1 kHz - 1 MHz. Koska kyseiseen tulevat aaltomuodot etenevät näillä taajuuksilla varsinkin metallisissa rakenteissa pitkiäkin etäisyyksiä, voidaan suhteellisen harvaan sijoitetuilla antureilla saavuttaa hyvä kattavuus. Menetelmistä ovat jo vakiinnuttaneet paikkansa irto-osien ja vuotojen havaitsemisjärjestelmät, joita käytetään useilla ydinvoimalaitoksilla. Materiaalin vaurioitumisesta ja siinä esiintyvien vikojen kasvusta syntyy energian vapautuessa useissa tapauksissa materiaalista joka suuntaan eteneviä värähtelymuotoja, jotka voidaan havaita riittävän herkillä mittausjärjestelmillä. Tämä varsinaisesti akustiseksi emissioksi kutsuttu rakenteiden monitorointimenetelmä ei kuitenkaan ole kehittynyt ydinvoimalaitoskäytössä samalla tavoin toimivaksi sovellukseksi kuin kaksi ensin mainittua.

### 2.1 Irto-osien monitorointi

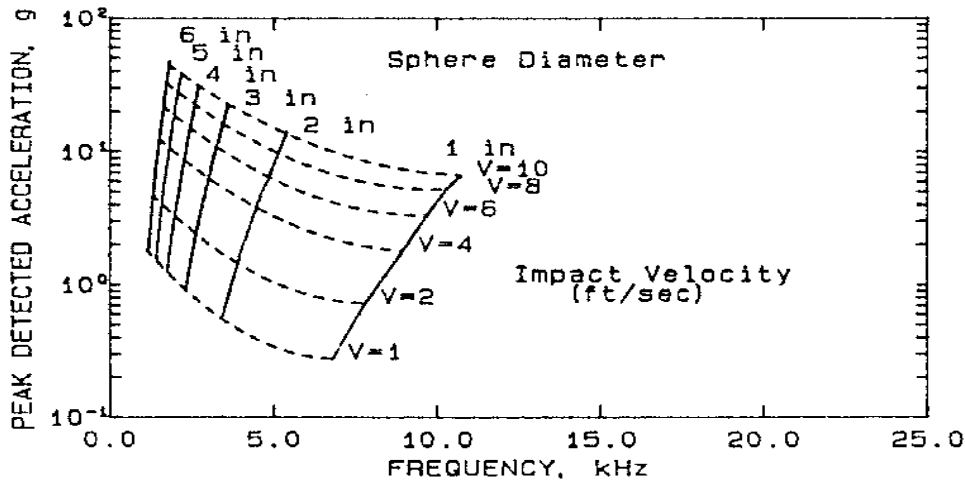
Irto-osien monitorointijärjestelmillä pyritään havaitsemaan ja paikantamaan ydinvoimaloissa primäärikiertopiirissä mahdolliset liikkuvat irtonaiset tai osittain irronneet osat. Järjestelmän periaatteellinen kuvaus on esitetty kuvassa 1. Pietsosähköiset anturit on kiinnitetty paineastian ja muiden primäärikierron komponenttien ulkopinnalle. Anturit havaitsevat metallisista iskuista syntyvät äänet, jotka etenevät pitkin rakennetta aaltoliikkeenä. Antureiden ja suodattimien valinnalla voidaan rajata käyttöön haluttu taajuuskaista. Käyttämällä sopivia esivahvistimia ja vahvistimia signaali saadaan siirrettyä amplitudiltaan halutun suuruiseksi valvontapaikkaan. Järjestelmiin kuuluu tavallisesti hälytyslaitteita, signaalin analysointi- ja tallennuslaitteita sekä usein myös audiokanava, jolla havaittavat signaalit voidaan toistaa korvan kuuloalueelle sopivalla taajuudella.





Kuva 1. Irto-osien monitorointijärjestelmän toimintaperiaate (Weiss & Mayo 1991).

EPRIn toteuttamassa laajassa irto-osien monitorointia koskevassa tutkimuksessa käytettiin teoreettisia tarkasteluja ja kokeita kvantitatiivisten menetelmien kehittämiseksi irto-osista syntyvien signaalien analysoimiseen. Tulosten mukaan irtonaisten osasten iskeytyessä primäärikierron seinämiin syntyy pääasiassa levyaaltoja, joiden amplitudi ja taajuus riippuvat törmäävän kappaleen massasta, nopeudesta ja kontaktipinnan koosta (Weiss & Mayo 1991). Eripainoisilla kappaleilla tehdyissä kokeissa havaittiin, että syntyvän signaalin taajuus vaihteli 1 - 10 kHz, kun herätteenä käytettiin 75 g - 16 kg:n painoisia teräspalloja. Painavien kappaleiden iskeytymistilanteessa kontaktiaika on pitkä ja syntyvän signaalin taajuus muodostuu matalaksi. Mittauksissa todettiin edelleen, että törmäysten aiheuttamat kiihtyvyyden arvot saattavat ulottua aina 100 G:hen asti isku-kohdassa. Tutkimuksessa päädyttiin tulokseen, jonka mukaan signaalien taajuutta voidaan käyttää melko hyvin iskeytyvän kappaleen massan arviointiin kuvan 2 osoittamalla tavalla. On kuitenkin huomioitava, että myös kappaleen nopeudella on oma vaikutuksensa taajuuteen.



Kuva 2. Graafinen kuvaus, joka esittää kappaleen koon ja nopeuden vaikutusta syntyvän signaalin taajuussisältöön ja voimakkuuteen. Tulokset on mitattu noin 1 m:n päästä iskukohdasta (Weiss & Mayo 1991).

Weissin & Mayon (1991) mukaan irto-osien monitoroinnissa käytetään tavallisesti resonanssiantureita, joiden resonanssitaajuus on tyypillisesti 22 - 27 kHz. Anturien resonanssitaajuuden alue pitää kuitenkin poistaa suodatuksella tai korjata laskennallisesti, jotta signaalin amplitudia ja taajuutta voitaisiin käyttää iskun aiheuttajan ominaisuuksien analysointiin. Käytännössä on lisäksi huomioitava anturin resonanssitaajuuden muutos, joka aiheutuu anturin asennuksesta monitoroitavaan pintaan. Hyvin viimeistellyllä pinnalla säilyy resonanssitaajuus yli 20 kHz:n alueella, mutta vain välttävästi viimeistellyillä pinnoilla resonanssitaajuudet jäävät 10 - 15 kHz:n alueelle. Asennuksessa saavutettava hyvä anturin kytkentä pintaan ja sen säilyvyys toiminnan aikana ovat merkityksellisiä, jotta anturin resonanssitaajuus ei siirry mittausten analysoinnin kannalta tärkeälle taajuusalueelle. Jos käytettävissä on taajuusalue 1 - 10 kHz, voidaan, kuten edellä todettiin, signaalin taajuuteen perustuen pyrkiä arvioimaan sellaisten irto-osien kokoja, joiden paino on 75 g - 16 kg. Jos halutaan ulottaa järjestelmän toimintaa tätä kevyempien osasten tarkkailuun, tulisi käytössä olevaa taajuusaluetta laajentaa aina 20 kHz:iin asti.

Järjestelmän toimivuus riippuu merkittävästi anturien lukumäärästä, sijoittelusta ja asennuksesta. Nämä tekijät vaikuttavat signaalilähteen sijainnin paikannusmahdollisuuksiin sekä edelleen signaalin amplitudin ja taajuussisällön perusteella tehtävään signaalilähteen analysointiin. Normaalisti anturien lukumäärässä on redundanssia irto-osien havaitsemiseksi, mutta antureiden määrä ei kuitenkaan riitä tarkkaan signaalilähteiden laskennalliseen paikannukseen. Yhdysvalloissa annettujen suositusten mukaan painevesireaktoreiden paineastiat tulisi varustaa kahdella kolme anturia käsittävällä renkaalla, joista toinen on paineastian alaosassa ja toinen sen yläosassa. Höyrystimiin tulisi asentaa vähintään kaksi anturia kuhunkin. Kiehutusvesireaktoreiden paineastioihin tulisi

samojen suositusten mukaan asentaa neljä kolme anturia käsittävää rengasta (Weiss & Mayo 1991). Yhdysvalloissa irto-osien monitorointiin sovellettava käytäntö on tarkemmin ohjeistettu muun muassa ASME Boiler and Pressure Vessel Code -standardin käyttöä ja ylläpitoa koskevassa osassa ASME OM-S/G-1994.

Yhdysvaltojen lisäksi irto-osien monitorointijärjestelmiä on aktiivisesti kehitetty Saksassa Siemens-KWU:n ja GRS:n (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH) toimesta. Saksalaisissa ydinvoimaohjeissa irto-osien monitoroinnista annetaan ohjeita KTA 3204:ssä (Kerntechnischer Ausschuss), jossa viitataan edelleen standardin DIN 25 475 osa 1:een. Saksalaisissa järjestelmissä käytetään painevesireaktorilaitoksilla 14 anturia sijoitettuna paineastiaan, höyrystimiin ja putkistoon ja vastaavasti kiehutusvesireaktorilaitoksilla 6 - 8 anturia sijoitettuna paineastian pinnalle (Nichols 1991).

Irto-osien monitorointi on laajasti käyttöön otettu tekniikka ja sen merkitys on yleisesti tunnustettu. Eräissä tapauksissa on ongelmana ollut suuri virheellisten hälytysten määrä. Toisaalta myös havaitsemiskykyä on pidetty liian heikkona ja signaalien tulkinnassa on esiintynyt vaikeuksia. Tekniikka muistuttaa osin värähtelymittausta, ja ne voivatkin eräissä tapauksissa tukea tai korvata toisiaan.

## 2.2 Vuotojen monitorointi

Vuotojen nopea ja täsmällinen havaitseminen on tärkeää jo niiden alkuvaiheessa, jotta vaurioitumisen jatkuminen ja kerrannaisvahingot jäisivät mahdollisimman pieniksi. Jos putkistoihin sovelletaan 'leak-before-break'-periaatetta, vuotojen ilmaisujärjestelmien tärkeys korostuu entisestään. Vuotojenilmaisujärjestelmien riittävän herkkyuden ja nopeuden lisäksi vaikuttaa järjestelmän antamaan hyötyyn myös sen kyky paikantaa vuotokohde ja ilmaista vuodon suuruus.

Ydinvoimalaitoksilla on käytössä useita vuotojen toteamiseen tähtääviä järjestelmiä, jotka perustuvat pääosin epäsuoriin mittaumenetelmiin. Tyypillisiä järjestelmiä, joilla vuotoja pyritään havaitsemaan, ovat tilojen kosteuden, lämpötilan ja säteilytason mittaukset, aktiivisen viemäröinnin tai huonetilan ilmastonin seuraaminen, lisäveden määrän tai vesikemian monitorointi. Näiden menetelmien nopeudet ja tarkkuudet vaihtelevat huomattavasti ja varsinkin vuodon paikannukseen ja määrän arvioimiseen käytettävät keinot saattavat olla hyvin rajoittuneita.

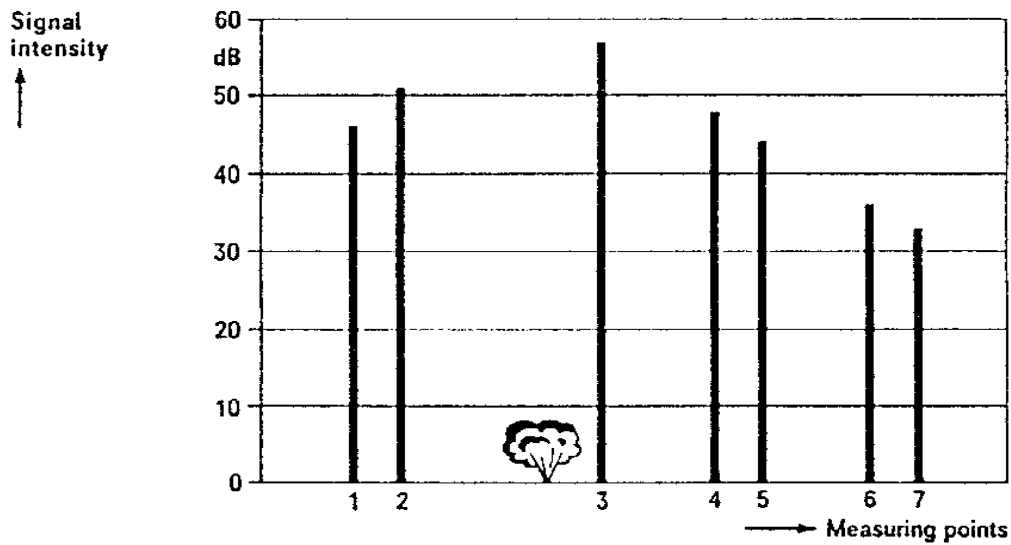
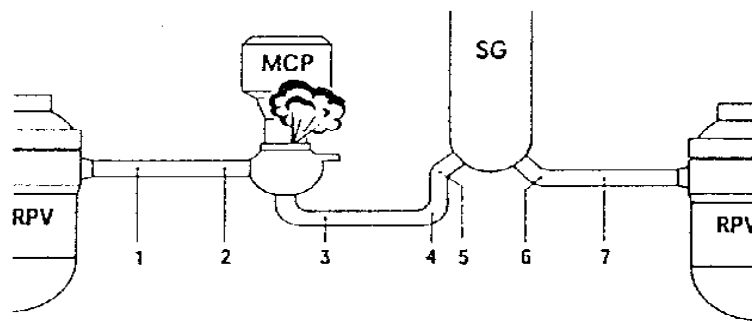
Vuodon aiheuttamaan akustiseen signaaliin perustuva mittausjärjestelmä reagoi vuotoon suoraan ja välittömästi. Vuodon purkautuessa riittävällä paineella syntyy turbulenti virtaus, josta aiheutuva akustinen signaali etenee metallisessa rakenteessa ja on havaittavissa useiden metrien päästä. Särömäisen vuotokohdan synnyttämä signaali on laajakaistainen, ja sen taajuusalue ulottuu MHz-alueelle. Toimivan kevytvesireaktorin

synnyttämän taustakohinan on todettu olevan suhteellisen vähäistä korkeilla taajuuksilla ja pysyvän näillä taajuusalueilla suhteellisen vakiona ajan suhteen. Tästä syystä 100 kHz:n yläpuolella oleva taajuusalue on sopiva vuotojen monitorointiin (Streicher 1991).

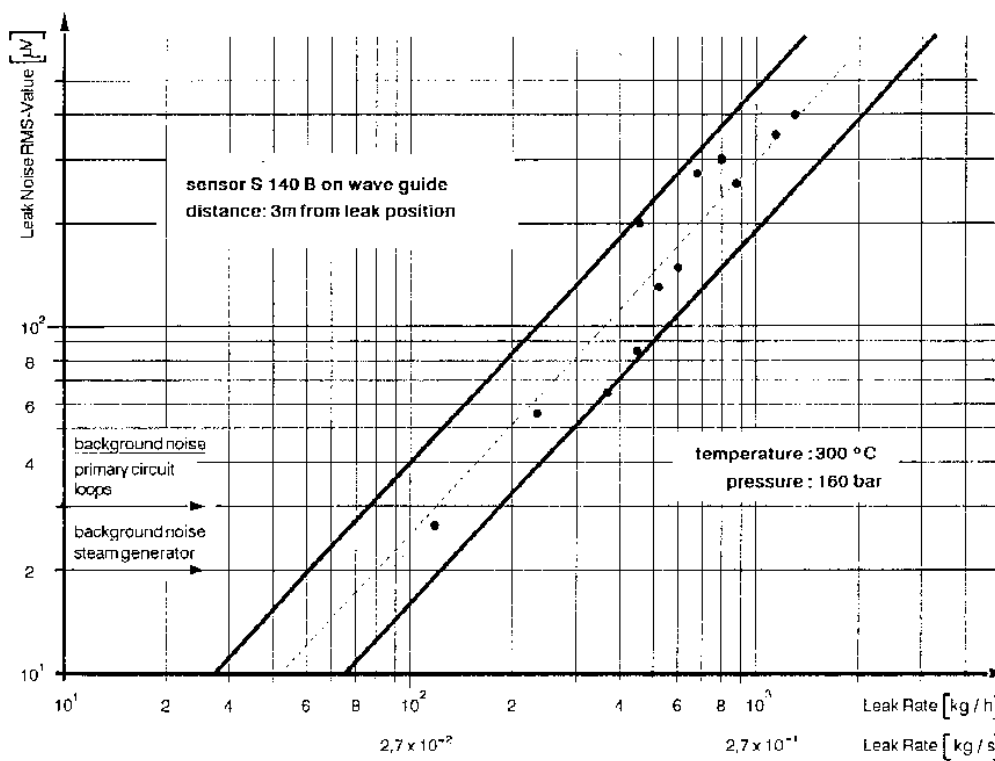
Vuotojen havaitsemiseen tarkoitetuissa järjestelmissä käytetään samantyyppisiä piezo-sähköisiä antureita kuin akustisen emission sovelluksissa. Koska monitoroitavat putkistot ovat usein kuumia, joudutaan anturien asennuksessa käyttämään metallisia aaltojohtimia. Aaltojohdin välittää mekaanisen signaalin monitoroitavasta pinnasta anturiin säilyttäen kuitenkin anturin lämpötilan riittävän matalana. Anturit sijoitetaan eri komponentteihin ja putkisto-osuuksille siten, että saavutetaan riittävä peitto koko monitoroitavalle alueelle ja otetaan samalla huomioon taustakohinan häiritsevä vaikutus. Monitorointi voidaan toteuttaa yksinkertaisesti mittaamalla antureista jatkuvasti signaalin RMS-taso (Root Mean Square) ja vertaamalla sitä asetettuun kynnyksiarvoon. Kunkin monitorointikanavan kynnyksiarvo voidaan puolestaan säätää siihen liitetyn anturin sijaintipaikan häiriötaustan mukaan. Signaalitason ylittäessä asetetun kynnyksiarvon järjestelmä antaa hälytyksen ja osoittaa vuodon sijaintialueen.

Kuvassa 3 on kuvattu ydinvoimalan (900 MW:n painevesireaktorilaitoksen) primääripiirin instrumentointia. Saman kuvan alaosassa nähdään esimerkinomaisesti signaalitasot, jotka syntyvät vuodosta antureiden 2 ja 3 välillä. Eri antureiden signaalitasojen perusteella järjestelmä kykenee laskennallisesti arvioimaan vuodon määrää ja sen sijaintipaikan (Streicher 1991).

Vuotojen havaitsemisherkkyys riippuu kunkin anturin kohdalla esiintyvistä taustakohinan suuruudesta ja vuotokohdan etäisyydestä anturista. Streicherin (1991) mukaan kohinatason ollessa matala voidaan havaita vuodot, joiden suuruus on vain 5 kg/h. Vuodon suuruuden arviointiin käytetään sen lasketun paikan perusteella korjattua signaalin voimakkuutta. Tällöin vuodon suuruus kyetään arvioimaan  $\pm 40$  %:n tarkkuudella. Kuvassa 4 on esitetty tuloksia, joita on saatu saksalaisella järjestelmällä mitattaessa signaalin suuruuden ja vuodon määrän välistä riippuvuutta.



Kuva 3. Ydinvoimalaitoksen primääripiirin AE-instrumentointi vuodonilmaisua varten. Kuvan yläosassa on numeroilla ilmaistu antureiden sijainti primäärikierron eri osissa. Kuvan alaosassa on esitetty syntyvät suhteelliset signaalitasot eri antureilla vuoto-tilanteessa (Streicher 1991).



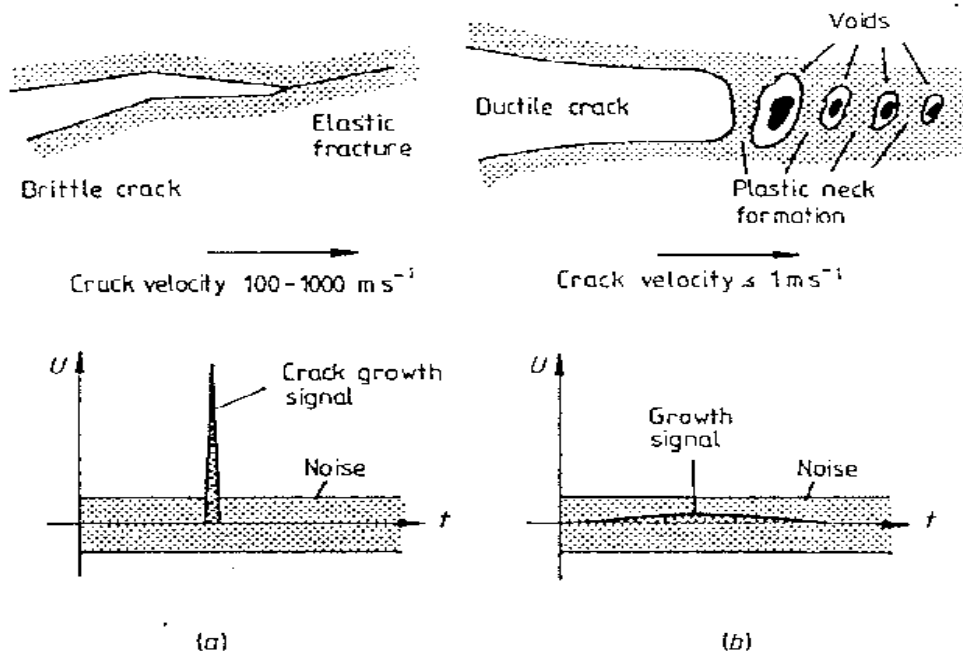
Kuva 4. Vuotosignaalin ja vuotomäärän välinen riippuvuus Siemens KWU:n kehittämässä ALÜS-järjestelmässä (Streicher 1991).

## 2.3 Akustinen emissio

### 2.3.1 Akustinen emissiotestaus

Akustinen emissio (AE) on passiivinen NDT-menetelmä, jonka avulla pyritään havaitsemaan materiaalin tai rakenteiden vaurioituminen käyttämällä hyväksi ensisijaisesti sitä energiaa, joka vapautuu itse vikojen synty- tai kasvuprosessista. Energiaa voi vapautua monien mekanismien kautta, joita ovat esimerkiksi särön kasvuhyppäykset, sulkeumien ja erkaumien irtoaminen tai rikkoutuminen, dislokaatioiden tai dislokaatioryhmien liike ja särön seinämien hankautuminen toisiaan vasten. Jotta tietyn mekanismin seurauksena syntyvä AE olisi havaittavissa, tulisi sen synnyttää purskemaisia energiapaketteja niin, että energiaa vapautuu riittävä määrä lyhyen ajan sisällä. Energian vapautuessa hitaasti taso jää liian matalaksi eikä sen synnyttämää signaalia kyetä havaitsemaan taustakohinan joukosta (kuva 5). Energia etenee rakenteessa aaltoliikkeenä kaikkiin suuntiin samalla vaimentuen, mutta signaalit on kuitenkin mahdollista havaita käytännössä suhteel-

lisen pitkienkin etäisyyksien päästä. Esimerkiksi metallirakenteissa anturien välit saattavat olla useita metrejä.



Kuva 5. Hauraassa särön etenemisessä vapautuu energiaa nopeasti (a), jolloin syntyy havaittavissa oleva AE-tapahtuma, mutta sitkeän särönkasvun tapauksessa energian vapautumisnopeus saattaa olla liian pieni (b), jotta signaalitaso ylittäisi vallitsevan kohinatason (Scruby 1987).

Koska AE:n käyttö perustuu materiaalin tai rakenteen itsensä aktiivisesti tuottamiin signaaleihin, on rakenne saatettava tilaan, jossa voidaan olettaa mahdollisten vaurioiden kasvavan tai ainakin aktivoituvan jollain tavoin. Tavallisimmin tämä tapahtuu rakennetta kuormittamalla, ja perinteisesti koekuormitustilanteet on katsottu testaukseen parhaiten soveltuviksi. Toisaalta voidaan katsoa, että käytön aikainen monitorointi AE:lla antaa mahdollisuuden seurata kaikkia niitä todellisia kuormitustilanteita, joita rakenteeseen käytännössä kohdistuu. Tällöin saattaa esiintyä suurempia tai rakenteen kannalta vaikeampia jännitystiloja kuin keinotekoisesti järjestelyillä koekuormituksilla voidaan aiheuttaa. Sen lisäksi, että käytön aikaisella monitoroinnilla voidaan tarkkailla rakenteen käyttäytymistä todellisuudessa esiintyvien rasitustilanteiden aikana, on toisaalta mahdollista havaita ja tunnistaa niitä tekijöitä tai hetkiä, jotka ovat rakenteelle kaikkein vaarallisimpia.

1980-luvulla AE-menetelmää kehitettiin ydinvoimateollisuuden piirissä innokkaasti ja käytettiin muun muassa useiden reaktoripaineastioiden painekokeiden yhteydessä. Nykyisellään näyttää mielenkiinto AE:n soveltamiseksi rakenteiden eheyden monitorointiin ydinvoimateollisuudessa vähentyneen huomattavasti. Tämä mielenkiinnon lasku johtunee osaltaan tutkimustuloksista, joissa on todettu, että särön kasvu saattaa

olla sitkeillä materiaaleilla hyvinkin äänetön ja sen vuoksi AE:n avulla vaikeasti havaittava prosessi. Tähän viittaavat esimerkiksi alla olevat kirjallisuudesta poimitut tutkimustulokset.

Nichols (1991) mainitsee raportissaan useita reaktoripaineastiamateriaaleja koskevia tutkimuksia ja niissä saatuja tuloksia. Staattisten säröjen havaitseminen painekokeiden aikana näyttäisi olevan selvästikin vaikeaa. Hän toteaa, että myös sitkeän särönkasvun toteamisessa sitkeässä perusmateriaalissa on päädytty eräissä tapauksissa negatiivisiin tuloksiin. Väsyttävän kuormituksen aikana säröt on tutkimuksissa useimmiten kyetty havaitsemaan, mutta signaalien on useinkin todettu liittyvän säröpintojen hankautumiseen. Itse särön kasvutapahtumasta saatavat signaalit voivat sitkeillä reaktoripaineastiamateriaaleilla olla heikkoja ja jäädä havaitsemiskynnyksen alapuolelle. Toisaalta Nichols (1991) mainitsee, että särönkasvun ylittäessä väsytyksessä  $0,1 \text{ mm}^2$  kuormitusjaksoa kohti on raportoitu syntyvän selvästi havaittavia signaaleja. Julkaistujen tulosten mukaan on myös kehitetty järjestelmiä, jotka kykenevät erottelemaan toisistaan säröpintojen hankauksesta ja särönkasvusta syntyvät signaalit.

Scruby et al. (1989) ja Macleod et al. (1991) toteavat, että signaalit, jotka havaittiin väsyttävässä sitkeää paineestiamateriaalia (A533B), olivat pääasiassa särön seinämien hankautumisesta johtuvia. Vain kuormituksen huipun yhteydessä havaittiin joitakin hyvin heikkoja signaaleja, jotka olisivat voineet liittyä suoranaisesti särön kasvuun. Tämän vuoksi katsottiin olevan epävarmaa, voidaanko AE:n avulla havaita luotettavasti ne signaalit, jotka syntyvät nimenomaan särön etenemisestä väsyttävän kuormituksen aikana hyvän sitkeyden omaavilla materiaaleilla. Koetilanteessa käytettiin satojatuhansia kuormitusjaksoja, jolloin oli mahdollista havaita ja paikantaa jopa kolmiulotteisesti seinämien hankautumisesta aiheutuneita, sekundäärisiä AE-signaaleja. Näiden paikannettujen signaalien avulla voitiin seurata särön etenemistä.

Suomessa toteutetuissa kokeissa, joissa kuormitettiin paksuseinäisiä painesäiliöitä hitaasti nousevalla vesipaineella, monitoroitiin keinotekoisien särön käyttäytymistä myös akustisella emissiolla. Säröstä peräisin olevia AE-signaaleja rekisteröitiin jo matalilla kuormitustasoilla, jolloin vasta särön kärjen arvioitiin plastisoituneen. Kuormituksen keskiosa oli emissioaktiivisuudeltaan vähäisempää. Kokeen loppupuolella särökannakseen plastisoiduttua kokonaan ja, jolloin nähtävästi myös tapahtui sitkeää särönkasvua, todettiin jälleen runsaasti akustista emissiota. Emissiosignaalien amplitudit kasvoivat selvästi kokeen loppua kohti (Keinänen et al. 1990 ja Sarkimo 1994).

Verbrugghe & Cherfaoui (1993) kuormittivat väsyttävällä nelipistetaivutuksella ruostumattomalla pinnoitteella päällystettyä ferriittisestä teräksestä (16 MND5) valmistettua suuridimensioista koekappaletta, jonka pinnoitteen alle oli tehty alkusärö. Särön havaitsemiseksi tehtiin määräväleihin kuormituskokeita käyttäen väsytykseen nähden suurempaa kuormitusta. Tuloksena todettiin, että ensimmäiseen ylikuormituskokeeseen liittyi huo-



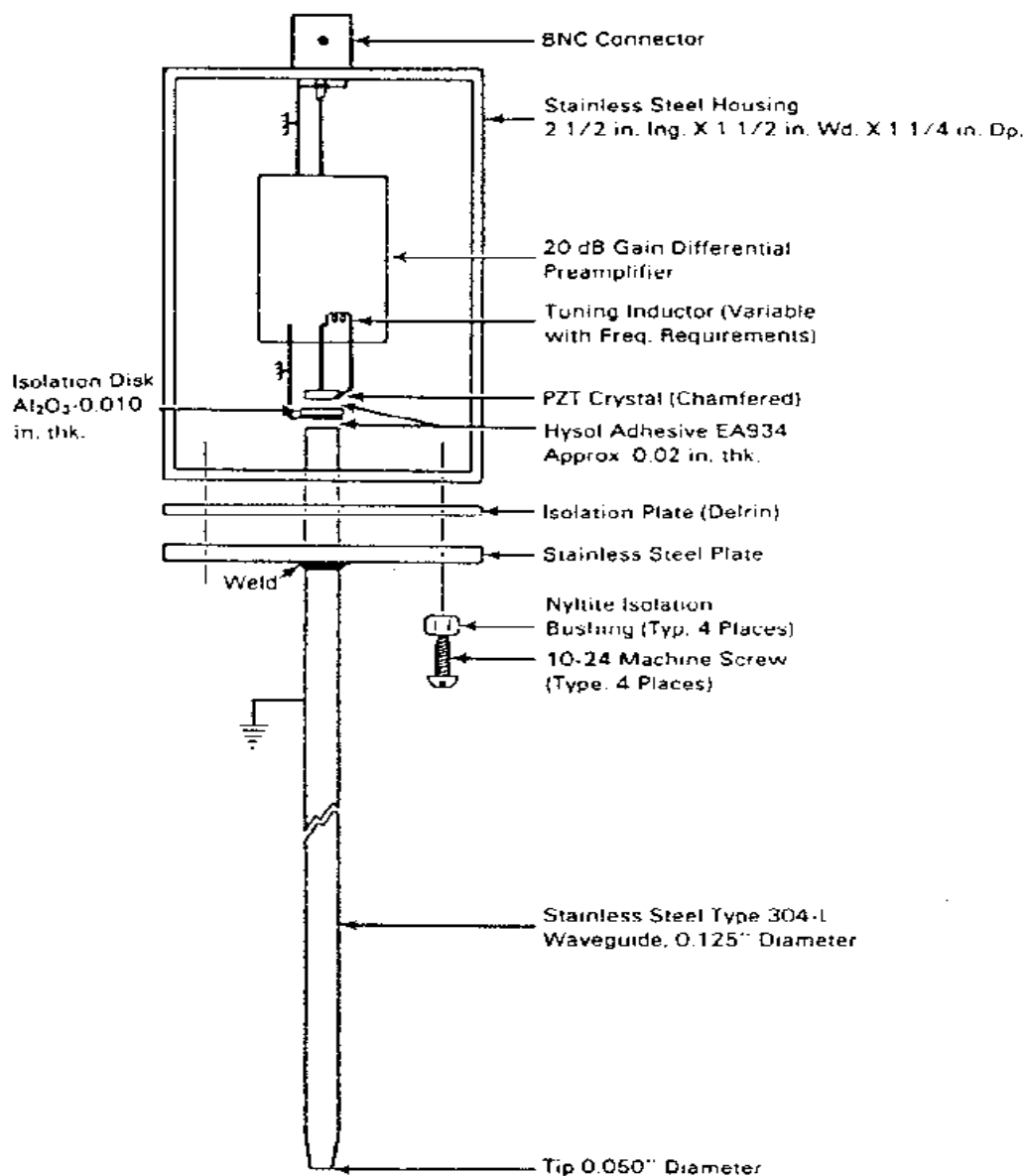
mattava AE:n määrä. Väsytyksen jatkuttua edelleen muiden ylikuormituskokeiden tuottama AE oli vähäistä ja tutkimuksen suorittajat epäilevät, ettei sitä olisi voitu havaita luotettavasti kenttäkäyttöisillä mittausjärjestelyillä. Väsytysvaiheiden aikana särön kasvaessa AE oli intensiteetiltään vaihtelevaa, ja särön käyttäytymisen ennustaminen AE:n perusteella todettiin vaikeaksi.

### **2.3.2 Jatkuvaan monitorointiin perustuva AE-testaus**

Akustisen emission voidaan ajatella soveltuvan toimintaperiaatteensa ja ominaisuuksiensa puolesta erittäin hyvin jatkuvaan monitorointiin. Vähäiselläkin anturimäärällä voidaan kattaa laajoja rakenteita ja mittausjärjestelmät on suunniteltu alun perin perustumaan automaattiseen datankeräykseen. AE:n käytölle jatkuvana monitorointimenetelmänä voidaan asettaa ainakin kolmenlaisia tavoitteita. Se toimii varoitusjärjestelmänä, joka ilmoittaa uhkaavasta tai jo alkaneesta vaurioitumisesta. Toiseksi sen avulla voidaan paikantaa ongelma-alueita, joille muita tarkastustoimenpiteitä tulisi ensisijaisesti suunnata. Ja kolmanneksi on mahdollista saada ohjaavaa tietoa rakenteen käyttöä tai prosessin hallintaa varten, jotta voitaisiin välttää rakenteen kannalta kaikkein pahimmat kuormitustilanteet.

Viime aikoina on ollut käynnissä useita tutkimus- ja kehityshankkeita, joissa AE-sovelluksia on pyritty kehittämään jatkuvan monitoroinnin alueella. Eräs merkittävimmistä on Yhdysvalloissa toteutettu laaja selvitys jatkuvan AE-monitoroinnin menetelmien kehittämiseksi, jotta säröjen syntyminen ja kasvu kyettäisiin havaitsemaan ydinvoimalaitoksen primäärikierron komponenteissa (Hutton et al. 1991). Ohjelmaa on rahoittanut suurelta osin U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) ja koordinoinnista on vastannut Pacific Northwest Laboratory (PNL). Tutkimusohjelmassa on tehty kokeita ja hyödynnetty tuloksia useista kansainvälisistä kokeellisista tutkimuksista, joita on toteutettu lähes 20 vuoden kuluessa.

Mainitun ohjelman puitteissa kehitettiin ja rakennettiin pitkäaikaista monitorointia varten mittauslaite, joka rekisteröi koko ajanjakson kuluessa esiintyvien AE-signaalien kaikki yleisimmin käytössä olevat parametrit. Kuumia kohteita varten kehitettiin anturirakenne, jossa suoraan pitkähkön (esimerkiksi eräässä sovelluksessa noin 3 m:n) aaltojohtimen päähän asennettiin pietsosähköinen kide, ja se koteloitiin esivahvistimen kanssa samaan koteloon kuvassa 6 esitetyllä tavalla. Aaltojohtimena käytettiin noin 3,3 mm:n paksuista ruostumattomasta teräksestä olevaa tankoa. Rakenteen avulla korkeita lämpötiloja huonosti kestävät anturiosat saatiin riittävän etäälle kuumista kohteista ja silti saavutettiin hyvä monitorointiherkkyys. Anturirakenteen todettiin lisäksi eliminoivan tehokkaasti jäähdytteen virtauksesta aiheutuvaa kohinataustaa yli 120 °C:n lämpötiloissa, kun toiminta-alue valittiin yli 300 kHz:n taajuusalueelta.



Kuva 6. Kaaviollinen esitys suoraan aaltojohtimen päähän rakennetun anturin ja esivahvistimen toteutuksesta (Hutton et al. 1991).

Ohjelmaan sisällytetyissä tutkimuksissa katsottiin, että väsyttävän kuormituksen aikana etenevien vikojen havaitsemisessa ja paikantamisessa onnistuttiin. Samoin jännityskorroosio pystyttiin havaitsemaan ohjelmaan kuuluneissa laboratoriokokeissa. Käyttöjaksojen jälkeen tehdyissä painekokeissa sen sijaan esiintyi vaikeuksia havaita vikoja riittävän luotettavasti. Näiden ongelmien katsottiin liittyvän nimenomaan tilanteisiin, joissa rakenne oli altistunut huomattaville kuormituksille ennen AE-testiä, mutta niitä ei katsottu voitavan laajentaa koskemaan esimerkiksi uusien käyttämättömien säiliöiden testejä.

Viimeisenä vaiheena Huttonin (1991) koordinoimassa ohjelmassa olivat toimivilla laitoksilla suoritettavat kokeet, joita toteutettiin Watts Bar Unit 1 -laitoksella käynnistystä edeltävien testien yhteydessä ja Limerick Unit 1 -laitoksella normaalin käynnin aikana.

Ensimmäisessä kohteessa (Watts Bar Unit 1) selvitettiin virtauksista aiheutuvan häiriötaustan tasoa. Lisäksi mitattiin menestyksellisesti AE-signaaleja primääriputkistoon kiinnitetystä säröilyä simuloivasta koekappaleesta sekä tunnettuja vikoja sisältäneestä reaktoripaineastian yhteestä.

Toisena verifiointikohteena käytettiin toimivan ydinvoimalaitoksen (Limerick Unit 1) erään yhteen hitsausliitosta, jossa oli todettu määräärikaistarkastuksessa vikaindikaatio. Ultraäänellä havaittu indikaatio oli tulkittu jännityskorroosiosäröksi, jonka pituus on noin 175 mm ja keskimääräinen syvyys noin 6 mm. Tarkoituksena oli havaita käytön aikana mahdollinen särönkasvu AE:lla ja määrittää sen suuruus sekä verrata tuloksia lopuksi muilla menetelmillä tehtyihin mittauksiin. Monitorointia tehtiin kahden latausjakson ajan. Laitoksen käynnistä ja muista syistä aiheutuva häiriötausta pystyttiin hallitsemaan ja monitorointi voitiin teknisesti toteuttaa onnistuneesti. AE-tulosten perusteella katsottiin kohteessa tapahtuneen särönkasvua jossain määrin kummankin latausjakson aikana. Ultraäänitarkastuksissa todettiin särön kasvaneen tietyltä osin ensimmäisen latausjakson aikana, mutta kasvua ei havaittu jälkimmäisen latausjakson aikana. AE-tulokset osoittivat mahdollisia särönkasvun kohtia eri puolille monitoroitavaa yhdettä, mutta tätä tulosta ei voitu vahvistaa ultraäänitarkastuksilla. Raportissa todetaan, että käytetyllä ultraäänitekniikalla ei mahdollisesti voitukaan havaita hyvin pieniä särösyvyyskokoja (alle 20 % seinämän paksuudesta), mikä voisi selittää tuloksissa esiintynyttä ristiriitaa. Loppuyhteenvetona tuloksista todetaan, että kahdella menetelmällä saadut tulokset olivat osittain yhdenpitäviä mutta osin myös keskenään ristiriitaisia. Lopullinen selvyys asiaan saataneen aikanaan rikkovalla tutkimuksella, jonka tuloksia raportissa ei esitetä (Hutton et al. 1993).

Lähinnä konventionaalisten voimalaitosten näkökulmasta on Electric Power Research Institute (EPRI) tutkinut AE:n soveltamismahdollisuuksia voimalaitosten eri komponenttien jatkuvaan monitorointiin. Harris et al. (1984) tekivät erittäin kattavan selvityksen höyryturbiinin roottorin särönkasvun monitorointimahdollisuuksista. Tutkimuksessa tehtiin paljon seikkaperäisiä laboratoriokokeita roottorimateriaaleilla särönkasvuun liittyvien AE-signaalien määrän ja voimakkuuden määrittämiseksi. Kun tuloksia suhteutettiin käynnissä olevasta turbiinista mitattuihin signaalitasoihin, päädyttiin melko pessimistiseen arvioon. Roottorin eliniän aikana oletettiin tapahtuvan 500 kylmäkäynnistystä, jotka aiheuttaisivat tietyn väsyttävän kuormituksen. Rikkoutumiseen johtavan särönkasvun arvioitiin kuitenkin tuottavan vain 17 - 260 havaittavissa olevaa AE-tapahtumaa, jolloin parhaimmillaankin keskimäärin vain noin yksi emissiotapahtuma voitaisiin rekisteröidä joka toisessa kylmäkäynnistyksessä. Raportissa esitetyn toisen mallin mukaan saatiin keskimääräiseksi signaalimääräksi 2 - 40 havaittavaa emissiota kylmäkäynnistys-

tä kohti. Varsinkin signaalimäärien alempi arvio, jota raportissa pidettiin luotettavampana, vaatisi erittäin tarkkaa ja kehittynyttä signaalien havainnointia ja analysointia, jotta voitaisiin varmistaa ”hyötysignaalien” rekisteröityminen vallitsevan taustakohinan joukosta.

Voimalaitosten putkistojen monitorointiin liittyen Coulter et al. (1987) tekivät edelleen EPRI:n organisoimassa projektissa kokeita höyryn kokoojakammioilla. He saivat ainakin epäsuoraa näyttöä siitä, että kokoojakammioiden säröytyminen tuotti havaittavaa AE:ta. Viimeaikaista aktiivisuutta menetelmänkehityksen alueella osoittaa raportti, joka sisältää ohjeistusta konventionaalisen voimalaitoksen putkiston testaamiseksi AE-menetelmällä laitoksen käynnin aikana (EPRI 1995). Päämääränä on käytönaikaisen monitoroinnin avulla paikantaa ne alueet, joille vaurioita syntyy, jotta tarkastusten tehokkuutta ja taloudellisuutta voidaan parantaa.

Suomessa jatkuvaan AE-monitorointiin perustuvaa rakenteiden kunnon- ja eheydenvalvontaa on toteutettu viime vuosina varsinkin useilla prosessiteollisuuden laitoksilla. Monitorointi on tähdännyt muun muassa jännityskorroosion aiheuttaman säröytymisen havaitsemiseen ja mahdollisten vuotojen varhaiseen toteamiseen.

Jatkuvaa AE-monitorointia koskeva luku ”Continuous Acoustic Emission Monitoring” on sisällytetty myös nykyiseen ASME Boiler and Pressure Vessel Code -standardikokoelmaan (ASME 1995). Siinä kuvataan vaatimukset jatkuvan AE-monitoroinnin toteuttamiseksi paineenalaisille, metallisille tai ei-metallisille komponenteille sovellettavaksi sekä ydinvoimalaitoksilla että konventionaalisilla laitoksilla. Kuvatun monitoroinnin tarkoituksena on havaita, paikantaa ja karakterisoida AE:n lähteet ja tulkita AE-signaalien merkitys paineenalaisten komponenttien eheyden kannalta. Standardi antaa seikkaperäisiä vaatimuksia käytettävälle laitteistolle ja ohjeita monitoroinnin toteuttamiseksi.

### 3. Jatkuva ultraäänimonitorointi

Ultraäänitestaus on nykyisin eräs yleisimmin käytetyistä NDT-menetelmistä ydinvoimaloiden määräaikaistarkastuksissa, ja sillä on vakiintunut asema sekä materiaalin sisällä että pinnalla esiintyvien vikojen etsimisessä. Koska tekniikalla on keskeinen asemansa särötyyppisten vikojen etsinnässä, voidaan tämän tekniikan ajatella soveltuvan hyvin myös havaittujen vikakohtien jatkuvaan seurantaan. Monitorointi on toteutettavissa kiinteän anturoinnin ja jatkuvatoimiseen mittaukseen sopivan laitteiston avulla. Sovellukset ovat toistaiseksi olleet harvinaisia, ja niitä on toteutettu ilmeisesti vain koeluontoisesti laboratorio-olosuhteissa.

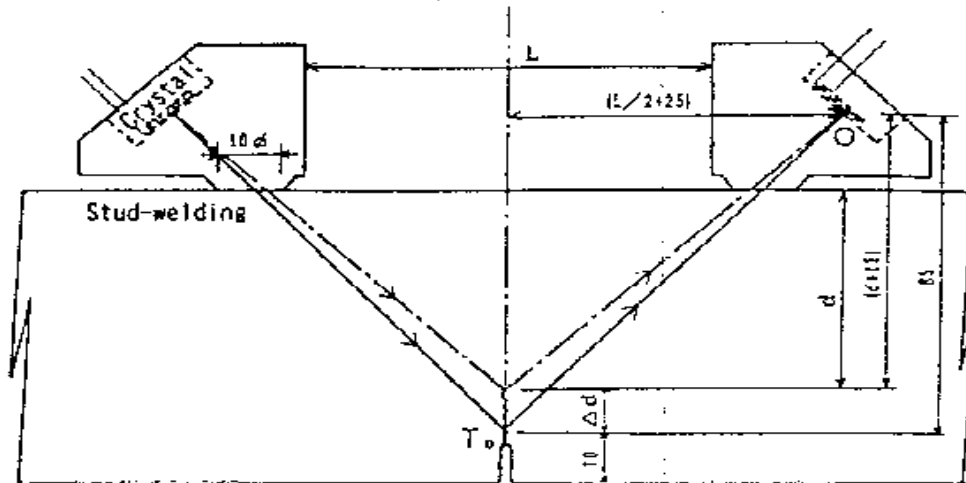
Voimalaitosolosuhteissa käytettäviltä antureilta vaaditaan käynninaikaisessa monitoroinnissa huomattavan hyvää kuumankestävyyttä. Arakawa et al. (1995) raportoivat saavuttaneensa riittävän kestävyuden anturin rakenteen erikoisratkaisulla. He kiinnittivät antureiden pietsosähköisen kiteen juottamalla perinteisen liimaliitoksen sijaan. Tällä tekniikalla valmistettujen antureiden todettiin kestävän suoritetuissa kokeissa satoja päiviä 500 °C:n lämpötilassa. Kun tällaista anturia käytettiin seinämän paksuusmittaukseen, sen todettiin säilyttäneen toimintakykynsä käytännön olosuhteissa ja 400 °C:n lämpötilassa yli neljän vuoden ajan.

Edellä kuvatulla tekniikalla valmistettuja antureita on kokeiltu myös väsytyssäröjen etenemisen monitorointiin sekä huoneenlämpötilassa että 300 °C:n lämpötilassa. Kokeet tehtiin laboratorio-olosuhteissa väsyttämällä kolmipistetaivutuksen avulla koekappaletta. Kappaleen pinnalle oli kiinnitetty vastakkain kaksi anturia, joiden luotauskulmat olivat 45°. Särön kärjen paikan mittaamiseen käytettiin TOFD-tekniikkaa (Time-of-Flight-Diffraction), jolloin toisen anturin toimiessa lähettimenä ja toisen vastaanottimena mitattiin särön kärjestä sironneen äänikomponentin kulkuajassa tapahtuvia muutoksia kuvan 7 osoittamalla periaatteella.

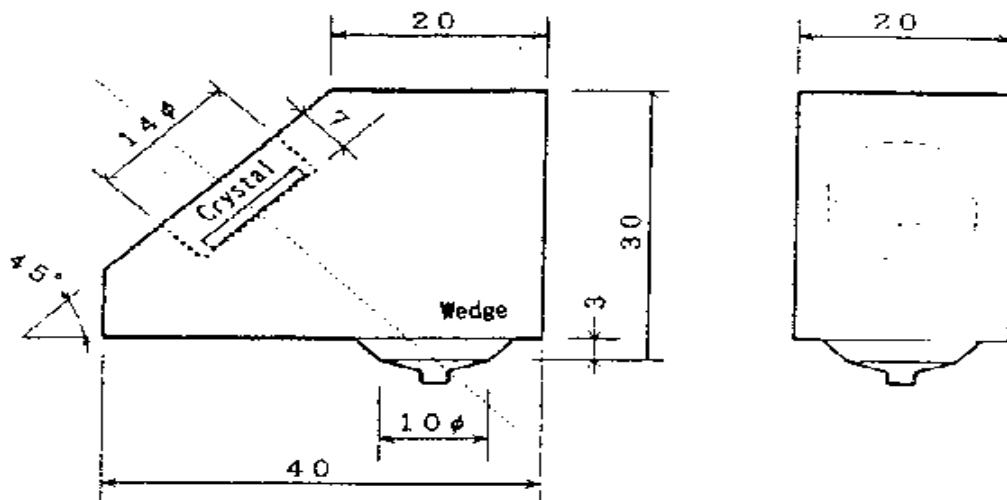
Testin aikana koekappaleeseen syntyi kipinätyöstetyn alkuloven kohdalle särö, joka eteni tasaisesti kuormitusjaksojen lisääntyessä. Jatkuvalla mittausperiaatteella tehty ultraäänimonitorointi pystyi seuraamaan kaiken aikaa särön kärjen etenemistä, ja saatu mittaustulos korreloi hyvin testikappaleen sivuista tehtyjen havaintojen kanssa. Samoin kokeen päättyessä murtopinnasta mitattu särön syvyys vastasi hyvin ultraäänimittauksen antamaa tulosta.

Koska kokeen jälkimmäinen osa toteutettiin korkeassa lämpötilassa, tarvittiin pitkäaikaista monitorointia varten anturin kiinnittämiseen ja kontaktin säilyttämiseen näihin olosuhteisiin sopivaa erikoistekniikkaa. Antureiden kiilaosa valmistettiin teräksestä ja muotoiltiin siten, että se voitiin kiinnittää tappihitsausta muistuttavalla menetelmällä suoraan tutkittavan kohteen pinnalle. Kuvassa 8 on esitetty anturirakenteen periaatteellinen toteutus. Hitsauksessa käytettiin apuna suurkapasiivisia kondensaattoreita, joilla

synnytetään tarvittava suuri hetkellinen hitsausvirta. Tekniikalla onnistuttiin tuottamaan hitsi, jonka halkaisija oli 10 mm ja muutosvyöhykkeen (HAZ) paksuus ainoastaan 0,2 mm mukaan lukien myös sulanut materiaalipaksuus (Arakawa et al. 1995).



Kuva 7. Kaaviomainen esitys ultraäänimittauksesta, jossa mitataan särön syvyyttä sen kärjestä sironneen äänikomponentin avulla (Arakawa et al. 1995).



Kuva 8. Kaaviokuva teräksiseen kiilaosaan perustuvan UÄ-anturin rakenteesta. Anturilla voidaan lähettää pitkittäisaaltoja 45 °:n kulmassa, ja se kiinnitetään luotauskohteeseen tappihitsausta muistuttavalla tekniikalla (Arakawa et al. 1995).

## 4. Sähkömagneettiset menetelmät

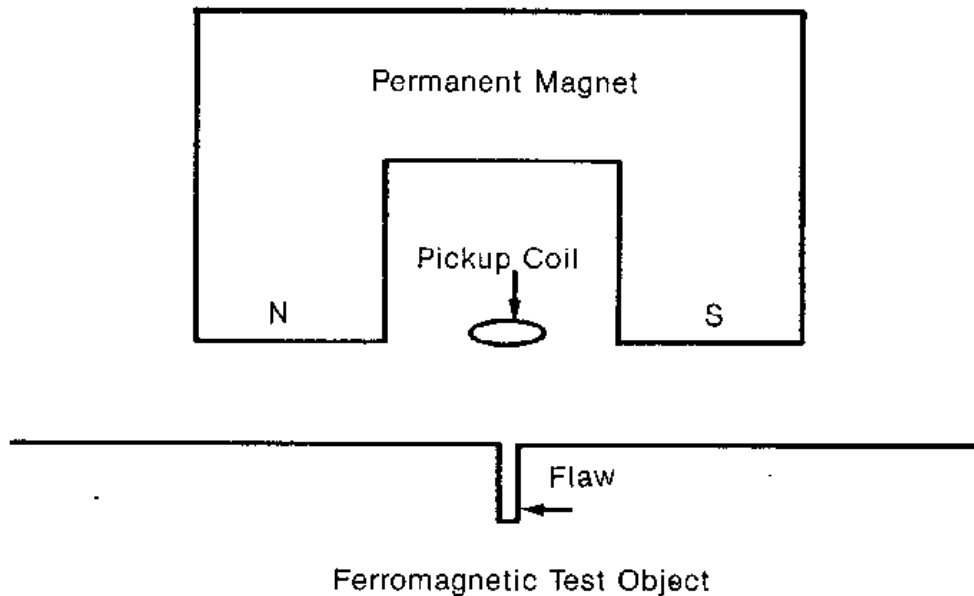
Sähkömagneettiset NDT-sovellukset ovat yleisesti käytettyjä, ja ne ovat osoittautuneet tehokkaiksi esimerkiksi särömaisten vikojen löytämisessä. Valtaosa sovelluksista on määräaikaista ja paikallaan pysyville kohteille tehtäviä tarkastuksia. Mainittuja menetelmiä voidaan kuitenkin varsin helposti käyttää myös liikkeessä olevien kohteiden tutkimiseen. Esimerkiksi pyörrevirtamenetelmää on sovellettu perinteisesti putkien, tankojen ja lankojen tuotantolinjoilla tapahtuvaan rikkomattomaan tarkastukseen. Näissä sovelluksissa tuote kulkee anturijärjestelmän läpi yleensä melko hitaalla, tuotantoprosessista riippuvalla nopeudella, joka on tyypillisesti 0,5 - 10 m/min. Pyörrevirtamenetelmän ja -laitteistojen ilmaisukyky riittäisivät huomattavasti suurempiinkin nopeuksiin. Koska mittausanturin kytkentä kohteeseen ei sähkömagneettisilla menetelmillä vaadi fyysistä kosketusta, järjestelmien mekaaninen toteutus on usein suhteellisen helppoa.

Sähkömagneettisia menetelmiä voidaan ajatella käytettäväksi myös liikkuvien, käytössä olevien kohteiden monitoroimiseen. Tällaisina sovelluksina voisivat tulla kysymykseen esimerkiksi pyörivät akselit ja laipat. Tällöin olisi mahdollista havaita pienempiä vikoja kuin värähtelymittauksilla ja saada suoraviivaisempaa tietoa kuin esimerkiksi akustisella emissiolla. Menetelmän etuihin voitaisiin laskea se, että indikaatiot ovat yleensä tulkittavissa yksikäsitteisesti, vian paikasta voidaan saada tietoa ja se, että anturin ei tarvitse koskettaa tutkittavaa kohdetta. Menetelmän varjopuolina voidaan nähdä instrumentoinnin hankaluus; anturi on sijoitettava tutkittavan alueen välittömään läheisyyteen ja sen kattama alue jää kapeaksi.

Electric Power Research Institutun (EPRI) teettämässä laajassa tutkimuksessa kehitettiin ja kokeiltiin erilaisia sähkömagneettisia anturijärjestelmiä ja niihin liitettäviä mittauslaitteistoja särömaisten vikojen havaitsemiseksi nopeasti pyörivistä kohteista (Bedrosian et al. 1988). Ensimmäiset kokeet tehtiin perinteisellä impedanssimenetelmällä, jota käytetään normaalisti pyörrevirtatestauksessa. Koekappale oli alumiininen akseli, jonka halkaisija oli noin 100 mm ja sen pintaan oli tehty 0,5 mm leveä, 1,5 mm syvä ja noin 13 mm pitkä ura. Pyörrevirtalaitteena käytettiin tavallista kaupallista laitetta ja siihen saatavia sarjavalmisteisia tasopintojen tarkastuksiin soveltuvia antureita. Urasta saatiin hyvä signaali akselin pyöriessä hitaasti (258 r/min), mutta pyörimisnopeuden noustessa signaali-kohinasuhde huononi merkittävästi. Esimerkiksi nopeudella 2 804 r/min vika-signaali erottui vain heikosti taustakohinasta. Kun testikappaleena käytettiin magneettista materiaalia, signaali-kohinasuhde heikkeni lift-off-tekijän takia niin paljon, ettei kokeissa saatu käyttökelpoista indikaatiota. Loppupäätelmänä todettiin, että impedanssimenetelmään perustuva järjestelmä ei sovellu vikojen etsimiseen nopeasti pyörivistä kohteista.

Seuraavassa vaiheessa kehitettiin kaksinapainen magneettikentän hyväksikäyttöön perustuva anturi (two pole hybrid pulsed/sinusoidal sensor). Sen periaate on esitetty

kuvassa 9. Kesto- tai sähkömagneetin avulla synnytetään tutkittavaan kohteen pintaan magneettikenttä, jota napojen välissä sijaitseva käämi mittaa. Kun magneettikenttään osuva liikkuva pinta on virheetöntä, pysyy siitä heijastuva, mittauskäämin havainnoima kenttäkin muuttumattomana eikä taustakohinan lisäksi saada muuta signaalia. Vian osuessa magneettikenttään muuttuu myös käämin aistima magneettikenttä ja käämiin indusoituu havaittavissa oleva jännitemuutos.



Kuva 9. Periaatekuva kaksinapaisesta magneettikentän hyväksikäyttöön perustuvasta anturista (two pole hybrid pulsed/sinusoidal sensor) (Bedrosian et al. 1988).

Menetelmä sopii sekä epämagneettisille että ferromagneettisille materiaaleille. Sovelluksessa käytetyn mittausperiaatteen todetaan sallivan suuretkin mittauskohteen liikenopeudet, ja rajoittavaksi tekijäksi muodostuu käytännössä mittauselektroniiikan nopeus. Tosiasiassa pyörimisnopeuden kasvun mainitaan parantavan signaali-kohinasuhdetta. Esimerkiksi kierrosnopeudella 3 600 r/min saatiin käytössä olleella testilaitteistolla 0,25 mm:n levyisestä urasta ferromagneettisessa materiaalissa hyvä signaali. Tämän tekniikan ja anturiratkaisun todettiin tarjoavan potentiaalisia mahdollisuuksia pintaan aukeavien vikojen löytämiseksi nopeasti pyörivistä metallisista kohteista.

Koska menetelmän resoluutiota haluttiin parantaa, selvitettiin EPRIn tutkimusohjelman seuraavassa vaiheessa yksinapaisen magneettikentän hyväksikäyttöön perustuvan anturin (single-pole hybrid pulsed/sinusoidal sensor) käyttömahdollisuuksia. Tässä tapauksessa anturi koostuu sauvamaisesta magneetista, jonka ympärille mittauskäämi on asennettu. Antureita on saatavissa kaupallisina versioina, ja niitä käytetään mittaamaan hammaspyörien pyörimisliikettä; anturi havaitsee sen ohittavat hampaat. Kaupallisella antu-



rilla tehdyissä kokeissa saatiin 0,5 mm:n urasta voimakas signaali koekappaleen pyöriessä nopeudella 3 915 r/min. Resoluution parantamiseksi edelleen tutkimusohjelmassa suunniteltiin ja rakennettiin nimenomaan NDT-tarkoituksiin sopiva anturi. Siinä magneetikenttä synnytetään kestopagneetilla ja johdettiin tutkittavaan pintaan pyöreällä ferromagneettisella vuonohjaimella, jonka halkaisija oli 1,1 mm. Mittauskäämi sijoitettiin vuonohjaimen ympärille.

Edellä mainitulla uudella yksinapaisella anturikonstruktiolla tehtiin useita koesarjoja erilaisten testaukseen vaikuttavien parametrien selvittämiseksi. Mitattaessa lift-off-arvoja todettiin, että tyydyttävästi kohinasta erottuva signaali saatiin epämagneettisilla materiaaleilla anturin ja tarkastuspinnan välisen etäisyyden kasvaessa aina noin 3 mm:iin asti, ja ferromagneettisilla materiaaleilla etäisyys sai olla jopa noin 5 mm. Kuitenkin käytännössä päädyttiin suosittamaan anturin sijoittamista, mikäli mahdollista, noin 1 mm:n etäisyydelle testauskohteesta. Vikasyvyyden vaikutusta saatavaan signaaliin testattiin erisyyksillä, halkaisijaltaan 1 mm:n kokoisilla porauksilla. Mittauksissa todettiin, että alkaen noin 0,25 mm:n syvyydestä porauksista saatiin luotettavasti havaittava signaali niin epämagneettisilla kuin ferromagneettisillakin materiaaleilla. Samalla havaittiin, että etenkin ferromagneettisilla materiaaleilla signaalin suuruus ei merkittävästi kasva vikasiyvyyden suurentuessa edelleen tästä minimiarvosta, joten vikasiyvyyden arviointi signaalin amplitudin perusteella on nähtävästi vaikeaa. Käytetyn anturin sivuttaissuuntaiseksi peittoalueeksi mitattiin noin 2,5 mm. Varioitaessa uramaisen vian leveyttä todettiin saatavan signaalin amplitudin kasvavan lähes lineaarisesti uraleveyden mukaan. Tulos oli sama sekä aksiaalisesti että kehän suuntaisesti sijoitetuilla vioilla. Signaalin suuruuden arveltiin riippuvan lähinnä puuttuvan materiaalin volyyminä eikä niinkään uran leveydestä.

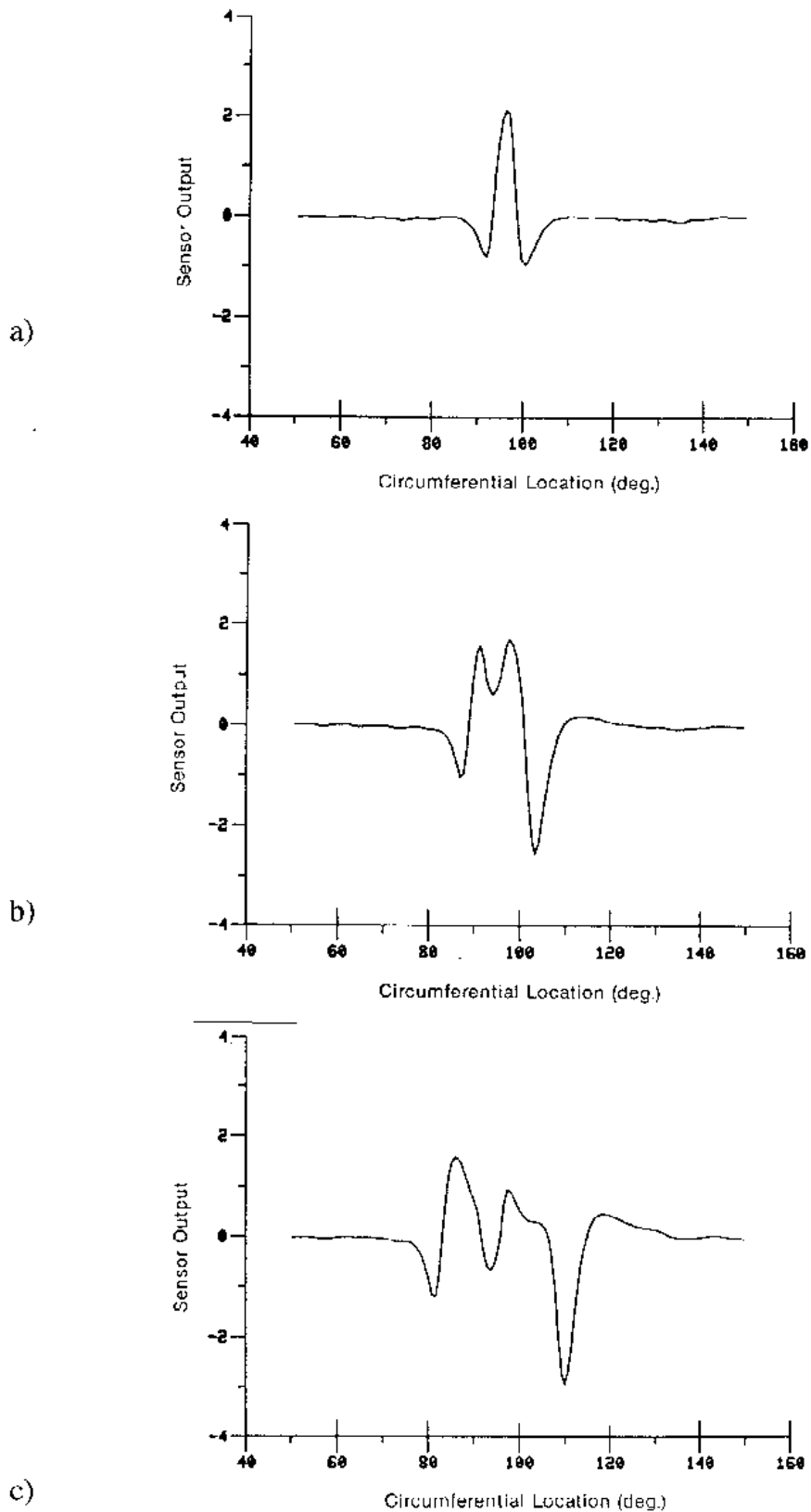
Asettamalla edellä kuvattuja antureita rinnakkain anturiryhmäksi saatiin muodostettua mittauselementti, jolla voitiin monitoroida suhteellisen pitkään alue ilman anturin liikuttelutarvetta. Tutkimusohjelmassa kehitettiin myös pitkäaikaiseen monitorointiin soveltuva mittauslaitteisto, jolla voitiin tarvittaessa tallentaa signaaleja, vertailla niitä keskenään ja siten seurata mahdollisen vian syntyä ja kasvua.

Tutkimusohjelman loppuun tehtiin koe, jossa kasvavaa säröä seurattiin viidestä elementistä kootun anturijärjestelmän avulla. Epämagneettisesta turbiiniakselimateriaalista valmistettiin halkaisijaltaan noin 170 mm oleva akseli, johon työstettiin poikittainen puolipyöreä ura, jonka leveys oli 12 mm. Uraan tehtiin edelleen puolipyöreä alkulovi väsytyssärön synnyttämiseksi. Kehäsuuntaisen loven leveys oli 0,4 mm ja säde 3 mm. Akselia pyöritettiin nopeudella 1 800 r/min kohdistuen siihen samalla taivuttava kuormitus, jolloin alkuloven kohdalle alkoi muodostua vähitellen kasvava särö.

Kuvassa 10(a) on esitetty alkulovesta saatu indikaatio. Kun särö oli kasvanut noin 19 mm:n pituiseksi saatiin kuvassa 10(b) näkyvä indikaatio. Tässä vaiheessa tunkeumanes-

teellä voitiin vahvistaa särön olemassaolo, mutta ultraäänellä säröä ei onnistuttu toteamaan. Kokeen lopussa särö oli 3 800 000 kierroksen jälkeen kasvanut noin 31 mm:n pituiseksi ja siitä saatiin kuvassa 10(c) esitetty näyttämä. Testin päättyessä särö voitiin todeta myös ultraäänellä ja mitata sen lopulliseksi syvyydeksi noin 9 mm.

Kehitetty tekniikka antaa mahdollisuudet monitoroida pyörivää kohdetta, esimerkiksi turbiinin tai generaattorin akselia, käynnin aikana ja havaita niissä säröjen syntyminen sekä seurata vikojen kasvua. Mahdollisten säröjen muodostumispaikoista pitää kuitenkin olla tieto, koska kiinteiksi asennettavien anturien avulla voidaan kattaa vain rajoitettuja alueita komponenttien pinnoista. Myös antureiden mekaaniseen kestävyYTEEN ja asennuksesta aiheutuviin riskeihin itse kohteelle joudutaan kiinnittämään paljon huomiota käytännön sovelluksia suunniteltaessa.



Kuva 10. Pyörivän akselin pinnalla sijaitsevan särömäisen vian tuottama näyttämä sen kasvun eri vaiheissa. (a) Alkulovesta saatu näyttämä, (b) särön pituus on kasvanut noin 19 mm:iin, (c) näyttämä testin päättyessä särön pituuden ollessa noin 31 mm (Bedrosian et al. 1988).

## 5. Värähtelymittaukset

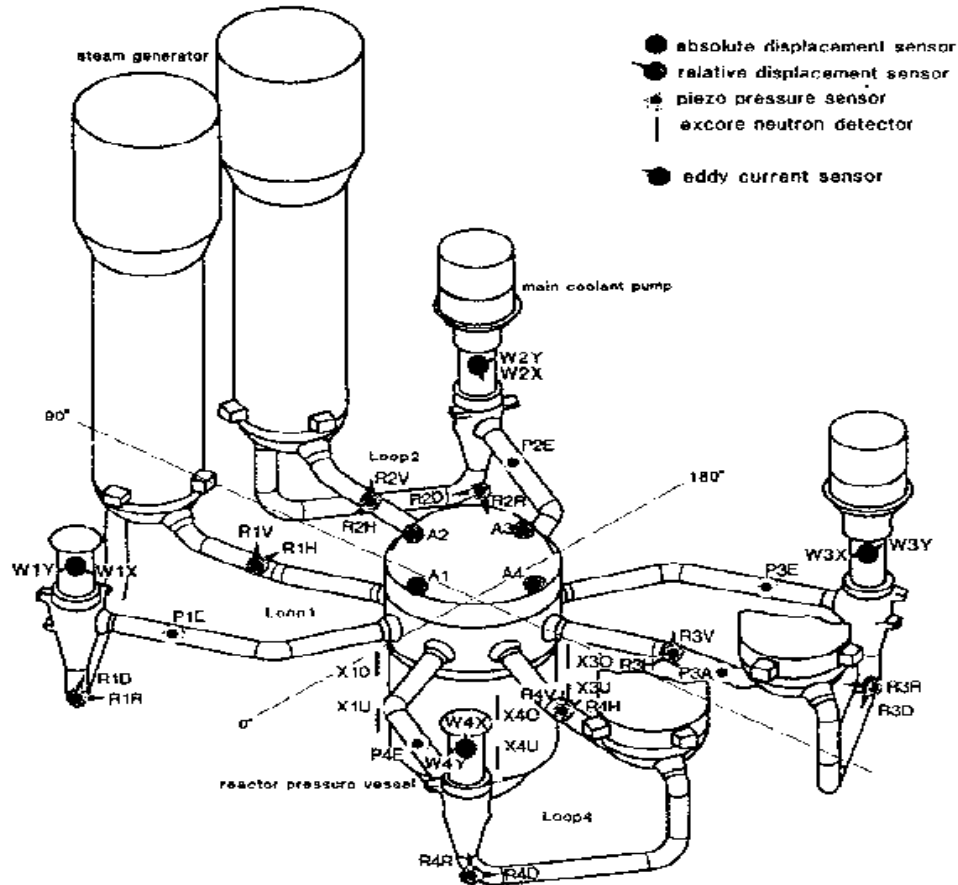
Koneiden ja laitteiden värähtelymittaukset ja -analyysit ovat osa nykyaikaista normaalia ennakkohoolto- ja kunnossapitotekniikkaa. Ydinvoimalaitosten suurten pyörivien koneiden, kuten turbiinien, generaattorien ja pääkiertopumppujen, valvontaan ne kuuluvat olennaisena osana, ja seuranta tapahtuu kiinteästi asennetuilla laitteilla reaaliaikaisesti. Värähtelyvalvonnan avulla saadaan tärkeää tietoa koneiden ja laitteiden yleisestä toimintakunnosta ja voidaan toisaalta havaita erilaisia vikoja ja vaurioita niiden varhaisessa vaiheessa. Tärkeänä tavoitteena onkin saada alkavasta vauriosta ennakkovaroitus, jonka avulla laitteen varsinainen rikkoutuminen voidaan välttää. Esimerkkeinä pyörivien koneiden vioista, joita on mahdollista havaita jo niiden alkuvaiheessa, mainittakoon laakerivauriot, linjausvirheet, akselien säröt ja vääntymät, pyörivien osien hankautumat sekä erilaiset vauriot, jotka aiheuttavat pyörivässä massassa epätasapainoa.

Värähtelymittauksiin käytetään kiihtyvyy- ja siirtymäantureita, jotka asennetaan eri mittaussuuntiin siten, että kaikki halutut värähtelysuunnat tulevat mitatuiksi. Mittausten analysointi perustuu pääasiassa amplitudien ja esiintyvien taajuuksien hyväksikäyttöön. Tavallisin yleisperiaate värähtelyseurannassa on pyrkiä havaitsemaan esiintyvät muutokset verrattuna aiempaan referenssisignaaliin. Tällaisena referenssisignaalina, johon kulloisiakin mittaustuloksia verrataan, voidaan käyttää mittaustuloksia esimerkiksi uudesta, oletettavasti virheettömästä laitteesta tai vaihtoehtoisesti toisesta vastaavasta laitteesta. Referenssisignaali voidaan tuottaa myös laskennallisesti värähtelymallin avulla.

Saksalaisissa ydinvoimalaitoksissa käytetään värähtelyjen valvontaan järjestelmiä, joissa käytetään hyväksi useilta erilaisilta antureilta saatavaa informaatiota. Järjestelmän tarkoituksena on antaa tietoja laitoksen käynnin aikana niiden primäärikierron komponenttien eheydestä ja toiminnasta, jotka ovat luoksepääsemättömiä voimalaitoksen toimiessa. Kerättävän tiedon analysointiin käytetään useita menetelmiä kuten korrelaatio-, taajuusanalyysi- ja hahmontunnistustekniikoita. Signaalien analysoinnin ja tulokinnan pohjaksi on kerätty laaja data-aineisto, jota voidaan käyttää automatisoidun järjestelmän referenssimateriaalina. Saksalaiset ydinvoima-alan standardit edellyttävät värähtelyn ja akustisten signaalien (irto-osien monitoroinnissa) mittaamiseen perustuvien monitorointijärjestelmien käyttämistä (Wach 1991).

Saksassa on tehty myös huomattavia tutkimuksia ydinvoimaloiden värähtelyvalvontaan tarvittavien järjestelmien, niiden toimintakyvyn ja optimaalisen instrumentoinnin määrittämiseksi. Näitä tutkimuksia on päästy parhaiten toteuttamaan suorittamalla kokeita ennen laitoksen käynnistystä tarvittavien testien yhteydessä. Kuvassa 11 on esitetty painevesireaktorilaitoksen laaja värähtelyinstrumentointi, joka sisältää kaikkiaan yli 40 anturia primääripiirin käynninaikaisen käyttäytymisen mittaamiseen. Järjestelmällä mitataan siirtymiä, jäähdytteen painetta ja neutronivuota, joiden avulla voidaan seurata

kattavasti primääripiirissä esiintyviä värähtelyjä, joita syntyy jäähdytteen virtauksen ja pääkiertopumppujen toimiessa herätteenä (Wach 1991).

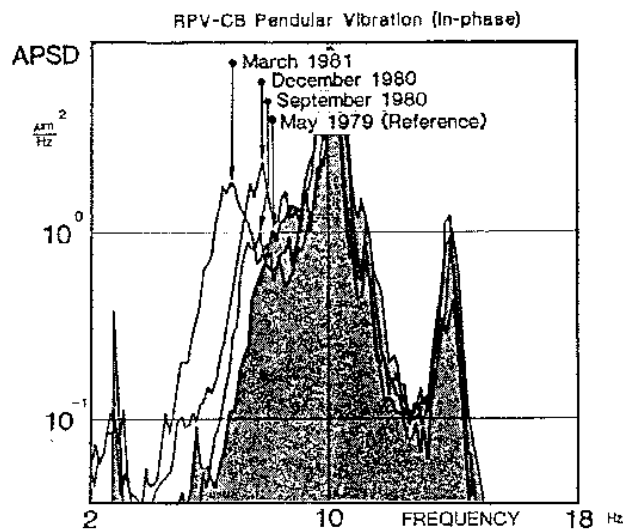


Kuva 11. Painevesireaktorilaitoksen primääripiirin värähtelyvalvontaan kehitetty sak-salainen instrumentointi, joka koostuu siirtymäantureista, paineantureista, paineastian ulkopoulisista neutronivuoantureista ja pyörrevirta-antureista (Wach 1991).

Ydinvoimalaitosten pääkiertopumput on yleensä varustettu värähtelyn valvontalaitteistoilla, joilla muiden häiriöiden lisäksi on voitu käytännössä todeta myös akseliin syntyneitä säröjä. Thibaut et al. (1994) toteavat, että normaalisti kyetään havaitsemaan viat, joiden takia akselin poikkipinta-ala on pienentynyt noin 25 %. Tätä kirjoittajat eivät kuitenkaan pidä riittävänä tasona, jotta akselien vaihtoon liittyvät toimenpiteet voitaisiin suunnitella ja toteuttaa parhaalla mahdollisella tavalla. Lisäksi on käytännössä esiintynyt tapauksia, joissa normaalilla tavalla monitoroiduissa akselissa säröt ovat ehtineet kasvaa huomattavasti suuremmiksi, ennen kuin vaihto on tapahtunut. Esimerkkinä värähtelyvalvonnan avulla havaitusta akselin säröytymisestä Wach (1991) raportoi tilanteen, jossa pääkiertopumpun värähtelymonitoroinnin perusteella päädyttiin pumpun pysäyttämiseen tilanteessa, jossa särö oli kasvanut jo 80 %:iin akselin poikkipinnasta. Tilanteen parantamiseksi Thibaut et al. (1994) ovat kehittäneet seisokkien aikana sovellettavaa

värähtelyanalyysimenetelmää. Menetelmä ei ole siten jatkuvaan monitorointiin perustuva tekniikka, mutta sen avulla akselien eheyden tutkiminen mainitaan voitavan tehdä kuitenkin huomattavasti normaaleja NDT-tutkimuksia nopeammin, koska pumppuja ei tarvitse purkaa. Menetelmässä akseliin kiinnitetään mittauslaipat, joiden kautta akseliin johdetaan herätevoima värähtelyn synnyttämiseksi. Mittaus tapahtuu samoihin laippoihin kiinnitettyjen anturien avulla. Värähtelytuloksia analysoimalla on suoritetuissa validointikokeissa voitu havaita särö, joka on ollut vain 4 % akselin poikkipinnasta.

Neutronivuon kohinan mittaukseen perustuen on kehitetty menetelmä, jolla voidaan seurata reaktorin sisäosien värähtelyjä käyttöjaksen aikana. Reaktorin sydämeen kuuluvien osien värähdellessä ympäröivän vesikerroksen paksuus vaihtelee ja moduloi neutronivuota, joka osuu paineastian ulkopuolella sijaitseviin neutronivuota mittaaviin antureihin. Jos sisäosien värähtelyominaisuuksissa tapahtuu muutoksia, voidaan päätellä, että itse sisäosissa tai niiden tuentaan ja asennukseen liittyvissä rakenteissa on tapahtunut muutoksia, kuten löystymistä tai rikkoutumista (Wach 1991). Tekniikka on saavuttanut vakiintuneen käytännön reaktoreiden sisäosien valvonnassa. Mittaus tehdään tyypillisesti kolme tai neljä kertaa latausjaksen aikana, jolloin tarkkaillaan mahdollisia muutoksia tai trendejä saaduissa mittausarvoissa. Menetelmällä on voitu todeta esimerkiksi sydämen tuentaan käytettyjen rakenneosien löystymistä, mitä kuvaava mittaustulos on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Neutronivuon kohinan mittauksessa saatu tulos eri mittausajankohtina käyttöjaksen aikana. Värähtelyspektrin trendinomainen siirtymä johtui sydämen tuentaan käytettyjen jousien löystymisestä (Wach 1991).

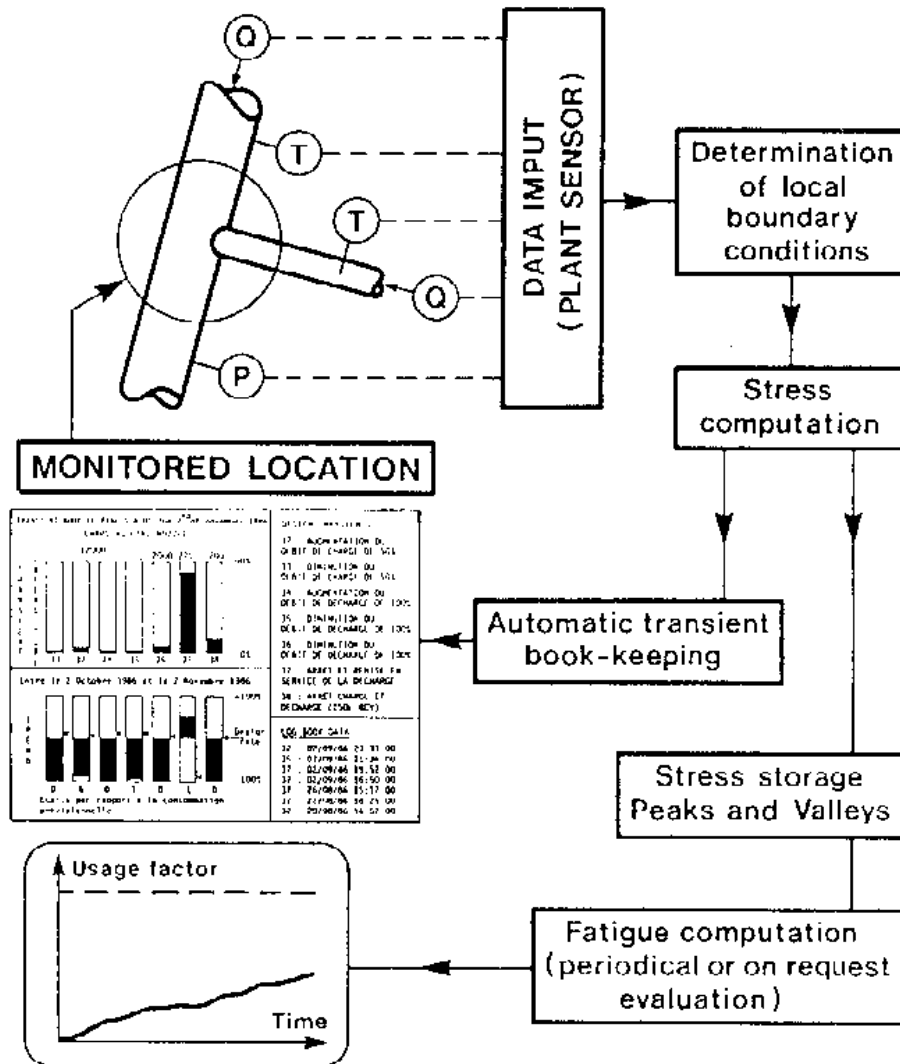
## 6. Kuormitusten ja venymien monitorointi

Ydinvoimalaitoksen suunnittelussa on laitoksen keskeisten komponenttien väsymistarkasteluissa käytetty lähtökohtana oletettuja transienttimääriä, joiden on arvioitu kuormittavan laitoksen osia sen tulevana toiminta-aikana. Pitkän laskennallisen toiminta-ajan kuluessa laitoksella todellisuudessa esiintyvien transienttien määrää ja todellista muotoa on kuitenkin vaikeaa ennustaa. Siten esiintyvistä laitoskohtaisista todellisista transienteista ja niiden määristä saatava tieto on arvokasta koko laitoksen elinikä ja sen eri komponenttien väsymisanalyysessä tarkistettaessa. Tästä syystä transienttien monitoroinnista ja niiden kirjaamisesta on tullut nykyisin normaalisti käytössä olevaa tekniikkaa. Tarvittavan tiedon mittaamiseksi voidaan tavallisesti käyttää laitoksen ohjaamiseen ja valvontaan liittyviä, olemassa olevia mittausrakenteita, ja niiden lisäksi tarvitaan ainoastaan tiedon keräämisestä ja analysoinnista huolehtiva järjestelmä (Nichols 1991).

Pyrittäessä transienttien kirjaamista tarkempaan tarkastelutapaan on esimerkiksi Ranskassa kehitetty jatkuvaan monitorointiin perustuvaa mittausrakennetta, ”Fatiguemeter” (Aufort et al. 1991). Prosessista mitataan lämpötiloja, paineita ja virtausmääriä käyttäen periaatteessa kuitenkin vain laitoksen olemassa olevaa instrumentointia. Kriittisiin kohtiin ei ole asennettu lisäinstrumentointia, vaan näiden alueiden kokemat transientit pyritään simuloimaan käyttämällä yksinkertaistettuja termohydraulisia malleja. Kuvassa 13 esitetty järjestelmä rekisteröi prosessista mitattavat suureet 10 s:n välein ja laskee vallitsevat jännitykset samassa tahdissa. Järjestelmä analysoi väsymisvaurioiden kehittymismahdollisuutta laskemalla käyttökerrointa kriittisiksi katsotuille alueille. Saksassa on kehitetty vastaava järjestelmä ”FatiguePro” monitoroimaan esimerkiksi paineistimen yhteen väsymiskertymää siten, että huomioidaan kohteessa tapahtuva kerrostumisesta aiheutuva lämpötilojen jakautuminen (Griesbach et al. 1991). Kuvattujen järjestelmien avulla on mahdollista suunnata määräaikaistarkastuksissa NDT-tutkimuksia kriittisille alueille ja jättää vähemmän rasitetut alueet pienemmälle huomiolle.

Suurinta tietoa todellisista esiintyvistä kuormituksista ja vallitsevista jännityksistä voidaan saada mittaamalla venymiä ja niiden vaihteluja käyttämällä esimerkiksi venymäliuskoja. Pitkäaikaiseen monitorointiin tähtäävät sovellukset ydinvoimaloissa käyttäen suoraa venymien mittausta ovat kuitenkin toistaiseksi harvinaisia (Nichols 1991). Suomessa on Loviisan voimalaitoksella väsymisen monitorointiin ja eliniän arviointiin kehitettyyn järjestelmään liitetty myös kiinteästi asennetut venymäliuskamittaukset (Neuvonen et al. 1995). Lämpötila- ja venymäliuskamittaus on asennettu paineistimen yhteeseen, paineistimen ja primäärikiertoputken liitoskohtaan, kahden höyrystimen syöttövesiyhteeseen ja paineistimen ruiskutusyhteeseen. Järjestelmällä on saatu runsaasti uutta tietoa vallitsevista todellisista kuormitusolosuhteista. Tietoa on voitu edelleen hyödyntää tehokkaasti laskettaessa kumulatiivista käyttökerrointa ja arvioitaessa särönkasvunopeuksia. Lisäksi järjestelmä tuottaa arvokkaita havaintoja laitoksen käytön-

aikaisten toimenpiteiden vaikutuksista kriittisten kohteiden kuormituksiin. Kertyneen tiedon avulla on myös voitu parantaa laitoksen tarkastuksiin ja käyttöön liittyviä ohjeita.



Kuva 13. Järjestelmä, jolla kirjataan automaattisesti transientit ja lisäksi lasketaan valituille alueille tarkempaa käyttökerrointa väsymisen suhteen (Aufort et al. 1991).



## 7. Materiaaliominaisuuksien monitorointi

Materiaaliominaisuuksien muutokset ovat erittäin keskeinen tekijä tarkasteltaessa ydinvoimalaitosten tärkeimpien komponenttien ja varsinkin reaktoripaineastian elinikää. Lukuisia rikkomattomia menetelmiä on tutkittu ja kehitetty materiaalin haurastumisen mittaamiseksi. Lisäksi useita menetelmiä on olemassa tai kehitteillä, joilla pyritään havaitsemaan ja arvioimaan virumisen ja väsymisen aiheuttamia vaurioita jo varhaisessa vaiheessa. Myös vallitsevien jännitystilojen mittaamiseen on pyritty löytämään luotettavia rikkomattomia mittaustapoja. Menetelmät perustuvat monien erilaisten fysikaalisten ominaisuuksien hyväksikäyttöön, joista mainittakoon materiaalien magneettiset, sähköiset ja ydinfysikaaliset ominaisuudet sekä esimerkiksi ultraäänen käyttäytymiseen vaikuttavat tekijät. Tässä esityksessä ei eri menetelmiä ja niiden sovelluksia käsitellä kattavasti vaan viitataan niitä koskeviin moniin julkaisuihin ja artikkeleihin, esimerkiksi Pitkänen 1991, Green 1990 ja Morgner 1994 ja aihetta käsittelevän symposiumsarjan julkaisuihin, esimerkiksi Höller et al. 1989 ja Bartos et al. 1996.

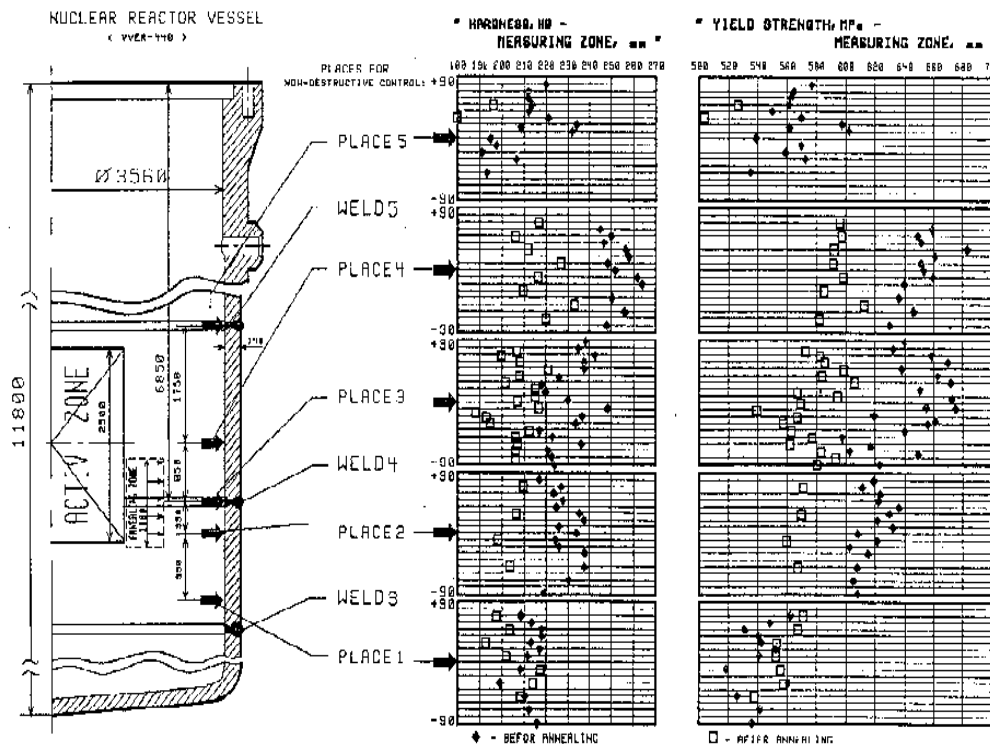
Tarkasteltaessa näiden menetelmien soveltamista jatkuvaan käytönaikaiseen monitorointiin, jää sovellusten määrä hyvin vähäiseksi. Nichols (1991) toteaa, että kirjallisuudesta ei löytynyt julkaisuja, jotka olisivat käsitelleet materiaaliominaisuuksien heikkene-  
misen havaitsemiseen tarkoitettujen NDT-menetelmien käyttöä jatkuvassa monitoroinnissa. On mahdollista, ettei niitä ole edelleenkään otettu jatkuvaan mittauskäyttöön teollisissa ympäristöissä. Monet näistä menetelmistä ovatkin kehittyneet vasta laboratorioasteelle ja useista sovelluksista puuttuvat kenttäkäyttöiset laitteet, joilla ylipäättänsä voidaan tehdä mittauksia suoraan kohteesta. Menetelmien kehittämisessä on kohdattu usein vaikeuksia, koska mitattavat fysikaaliset muutokset ovat hyvin pieniä, jolloin mittaus-epätarkkuudet saattavat helposti vääristää tulokset. Lisäksi mitattavat pienet fysikaaliset suureet saattavat riippua yhtäaikaan useasta tekijästä, joissa voi tapahtua muutoksia samanaikaisesti. Esimerkiksi haluttaessa mitata materiaalin sitkeysominaisuuksien muutosta saattavat tulokseen lisäksi vaikuttaa vallitseva venymä, seostus tai metallurginen rakenne, jolloin tulosten tulkinta muodostuu hyvin hankalaksi.

Esimerkkinä aihepiiriä koskevasta kehitystyöstä voidaan mainita kineettiseen kovuusmittaukseen perustuva menetelmä materiaaliominaisuuksien määrittämiseksi (Bakirov 1996). Tämän mittausmenetelmän kehittämisessä on tavoitteena ollut päästä mittaamaan materiaalin mekaanisia ominaisuuksia suoraan käytössä olevasta rakenteesta. Menetelmä perustuu kovuusmittaukseen, jossa rekisteröidään koko mittauspahtuman ajan mittakärkeen kohdistettava voima, mittakärjen painumasyvyys materiaaliin ja mittakärjen painumisen nopeus. Mittaus tehdään aktiivisen kuormitusvaiheen, voiman pidon ja voiman poiston aikana. Saaduista mittaus tuloksista rekonstruoidaan kehitetyn laskentamallin avulla jännitys-venymäkäyrä materiaalin mekaanisten ominaisuuksien arvioimiseksi. Menetelmän soveltamiseksi käytäntöön on kehitetty valikoima mekaanisia laitteistoja, joilla kyetään suorittamaan mittauksia erilaisista kohteista. Menetelmää on käy-

tetty esimerkiksi säteilyn aiheuttaman materiaalin vanhenemisen mittaamiseen sekä testikappaleista että käytössä olevan reaktoripaineastian seinämästä. Kuvassa 14 on esitetty menetelmällä saatuja tuloksia, joita on mitattu ennen ja jälkeen reaktoripaineastian toivutushehkutusta. Eräänä menetelmän ilmeisenä heikkoutena on se, että parhaimmillaankin sen avulla voidaan saada tietoa vain materiaalin pintakerrosten ominaisuuksista.

### THE RESTORATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES IN THE TIME OF THE ANNEALING

( NPP "KOZLOVIT" UNIT 2, BULGARIA / FEBRUARY-MARCH, 1992 )



Kuva 14. Kineettisellä kovuusmittauksella saadut tulokset eri mitta-alueilta ennen ja jälkeen reaktoripaineastian toivutushehkutusta (Bakirov 1996).

Blaszkiwicz (1996) on koontanut kattavan yhteenvedon NDT-menetelmistä, joita on tutkittu pyrittäessä löytämään keinoja ydinvoimaloiden paineastioiden säteilyhaurastumisen mittaamiseksi. Tämän selvityksen mukaan ultraäänitekniikat vaikuttavat lupaavimmilta, koska haurastumisen kannalta kiinnostavat materiaaliominaisuudet näyttävät liittyvän läheisesti ultraäänien etenemisominaisuuksiin, kuten äänennopeuteen ja vaimenemiseen. Muita selvityksessä läpikäytyjä menetelmiä olivat sähköiseen vastukseen, magneettiseen hysterees-ilmioon, Barkhausen-kohinaan, magnetoakustiseen emissioon ja pyörrevirtoihin perustuvat mittaukset. Eri tekniikoilla ei kuitenkaan toistaiseksi ole saavutettu yksikäsitteisiä tuloksia, jotka tukisivat niiden käyttöä säteilyhaurastumisen

toteamiseen. Tutkimuksissa on usein pyritty korreloimaan NDT-tuloksia suoraan materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten iskusitkeyden transitiolämpötilaan tai materiaaliin kohdistuneeseen säteilymäärään. Sen sijaan tutkimukset, joissa korrelaatiota on etsitty materiaalin mikrorakenteen kanssa, ovat harvinaisia. Selvityksen mukaan olisi tärkeää löytää ensin ne perimmäiset syyt, jotka vaikuttavat NDT:llä saataviin tuloksiin ja vasta sitten etsiä korrelaatioita mekaanisten ominaisuuksien kanssa.

Suomessa tehdyistä selvityksistä mainittakoon myös Ilolan (1992) kattava diplomityö tutkimusmenetelmistä, joita voidaan soveltaa reaktoripaineastiaterästen säteilyhaurastumisen ja toipumisen mekanismien tutkimiseen. Työssä on koottu muun muassa laaja taulukko, jossa on kuvattu eri menetelmien käyttöalue, rajoitukset ja soveltuvat näytteet. Lisäksi on kunkin menetelmän osalta arvioitu sen soveltuvuus haurastumisen osatekijöiden (erkaumat, matriisi ja raerajat) tutkimiseen. Tutkimuksessa todetaan, että osa menetelmistä on otettu jo laajasti käyttöön, mutta toinen osa on uusia, toistaiseksi tuntemattomampia, joiden käyttö lisääntyy mahdollisesti tulevaisuudessa. Näistä menetelmistä kuitenkin useimmat ovat laboratoriomenetelmiä, joilla mittaukset tehdään kohteesta irrotetuille koepaloille. Työssä tehtiin kokeellisia mittauksia käytännön paineastiamaerialilla sisäisen kitkan, ominaisvastusmittausten ja Mössbauer-spektroskopian soveltuvuuden kokeilemiseksi.

Materiaaliominaisuuksien mittaukset vaativat niiden suorittamista hyvin kontrolloiduissa olosuhteissa, jotta voitaisiin eliminoida muiden kuin juuri halutun mitattavan suureen vaikutus mittaustulokseen. Tätä vaatimusta voidaan osaltaan pitää hyvänä perusteluna jatkuvaluonteisten mittausten suorittamiselle. Kiinteästi asennetut anturit takaavat sen, että mittauskohda pysyy muuttumattomana. Samoin jatkuvan mittauksen periaatteella toimittaessa mittaustuloksia voidaan saada toisiaan vastaavissa prosessin tiloissa, jolloin voidaan olettaa kuormitusten tai/ja lämpötilojen vastaavan toisiaan.

## 8. Yhteenveto

Raportissa käsitellään pääasiassa kirjallisuudesta kerättyihin tietoihin perustuvan monitoroinnin menetelmiä, joita käytetään tai voidaan soveltaa erilaisten rakenteiden ja laitteiden eheyden valvontaan. Eräs tärkeimmistä eduista, joita jatkuvalla monitoroinnilla voidaan saavuttaa, on välittömän tiedon saanti ongelmasta jo sen alkuvaiheessa, jolloin voidaan parhaassa tapauksessa estää varsinainen rakenteen rikkoutuminen tai ainakin kyetään usein rajoittamaan seurauksia ja vähentämään kerrannaisvaiikutuksia. Lisäksi käytön aikaisella monitoroinnilla voidaan kerätä hyödyllistä tietoa käytön aikana vallitsevista todellisista olosuhteista, rakenteeseen kohdistuvista kuormituksista ja muista rasituksista.

Akustiseen emissioon perustuvat sovellukset ovat melko helposti toteutettavissa pitkäaikaisina mittausjaksoina, koska sovellusten tiedon keruu ja analysointi tapahtuu lähes poikkeuksetta pitkälti automatisoituna tietokoneen avulla. Suhteellisen pienellä anturimäärällä voidaan lisäksi kattaa suuriakin rakenteita, ja monitorointi voidaan ulottaa muutoin hankalasti luoksepäästäviin alueisiin. Akustisten signaalien hyväksikäyttöön perustuvat irto-osien ja vuotojen monitorointimenetelmät ovat kehittyneet hyväksytyiksi sovelluksiksi, joita käytetään useilla ydinvoimalaitoksilla. Ongelman havaitsemisen lisäksi voidaan käytössä olevien analyysien avulla tehdä arvioita irto-osien koosta ja vuotojen suuruudesta. Rakenteiden eheyden varmistamiseen tarkoitettujen järjestelmien, joilla voitaisiin havaita esimerkiksi säröjen syntyminen ja kasvu, eivät ole saavuttaneet varauksetonta hyväksyntää. Tällaiseen monitorointiin tähtäävät järjestelmät ovat olleet ydinvoimalaitosten osalta yksittäisiä ja kokeiluluonteisia.

Ultraäänen hyväksikäyttöön perustuvalla monitoroinnilla on mahdollista seurata rakenteissa havaitun särön etenemistä. Esimerkiksi väsymissärön kasvun monitoroinnista laboratorio-olosuhteissa on raportoitu hyviä tuloksia. Käytännön voimalaitosolosuhteet edellyttävät antureilta hyvää kuumankestävyyttä, jota on pystytty lisäämään kehittämällä anturirakennetta.

Sähkömagneettisilla mittausmenetelmillä on osoitettu voitavan paikallisesti monitoroida nopeasti pyörivien komponenttien, kuten turbiini- ja generaattoriakseleiden, pintoja ja havaita mahdollisten säröjen synty ja kasvu. Menetelmä sopii sekä epämagneettisille että ferromagneettisille materiaaleille. Pintaan aukeavat matalatkin säröt on mahdollista havaita. Instrumentoinnin toteuttaminen muodostuu sovelluksen kannalta kuitenkin hyvin vaativaksi, koska anturit on saatava monitoroitavan pinnan välittömään läheisyyteen. Fyysistä kosketusta kohteeseen ei kuitenkaan tarvita.

Värähtelyjen mittaaminen ja analysointi ovat jo vakiintunutta tekniikkaa monilla teollisuuden aloilla, ja pitkälle kehitettyjä menetelmiä on tarjolla pyörivien koneiden valvontaan. Ydinvoimalaitosten turbiinigeneraattorit ja pääkiertopumput ovat normaalisti

varustettu kiinteillä reaaliaikaisilla järjestelmillä. Monitoroinnin avulla voidaan havaita monenlaisia vikaantumislmiöitä jo niiden alkuvaiheessa. Neutronivuon kohinamittaukseen perustuva reaktorin sisäosien värähtelyn analysointi on erikoissovellutus, jolla voidaan tarkkailla sisäosien kuntoa ja havaita niissä tapahtuvia mahdollisia muutoksia käyttöjakson kuluessa.

Rakenteisiin kohdistuvien todellisten rasitusten arvioimiseksi ja seuraamiseksi käytön aikana on kehitetty useita pääasiassa laskennallisiin keinoihin perustuvia järjestelmiä, joiden tarvitsema lähtötieto pyritään saamaan laitoksen normaalin paine-, lämpötila- ja virtausmittauksesta huolehtivan instrumentoinnin kautta. Näiden järjestelmien avulla seurataan reaaliaikaisen laskennan avulla kriittisten rakenneosien väsymistä. Myös esiintyvien jännitysten mittaaminen esimerkiksi venymäliuskoilla on toteutettavissa, jotta voidaan saada mahdollisimman oikeita lähtötietoja laskentaa varten. Rakenteiden kriittisiä kohtia kartoittavien analysointijärjestelmien avulla saadaan arvokasta tietoa, jota voidaan käyttää hyväksi NDT-tarpeiden mitoittamisessa ja tarkastusten suuntaamisessa oikeille alueille.

Materiaaliominaisuuksien seuraaminen ja niissä tapahtuvien muutosten toteaminen ovat keskeisiä esimerkiksi ydinvoimaloiden primäärikierron komponenttien osalta. Ominaisuuksien selvittäminen rikkomattomin keinoin on saanut osakseen paljon mielenkiintoa, ja useita erilaisia menetelmiä on syntynyt muutosten tai alkavien vaurioprosessien havaitsemiseksi materiaalissa. Näistä menetelmistä useimmat ovat kuitenkin toistaiseksi vasta laboratorioasteella. Monet menetelmät perustuvat hyvin pienten fysikaalisten parametrimuutosten mittaamiseen, mikä tekee luotettavien sovellusten kehittämisen vaativaksi. Jatkuvaan monitorointiin ei näillä menetelmillä ole nähtävästi toistaiseksi päästy, vaan parhaimmillaan ne ovat toistuvia samasta kohdasta tehtyjä mittauksia. Jo käyttämällä kiinteää instrumentointia voitaisiin kuitenkin saavuttaa se etu, että mittauskohta pysyy suurella varmuudella samana kerrasta toiseen ja mittaus päästään helpommin tekemään haluttuna hetkenä.

## Lähdeluettelo

Arakawa, T., Tanosaki, M. & Yoshikawa, K. 1995. On-line monitoring techniques of crack propagation using brazed-type ultrasonic sensors for high temperature use. Proceedings of the 13th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, Kyoto, Japan, 22 - 25 May, 1995. Ohio: ASM International. S. 217 - 221.

ASME Boiler and Pressure Vessel Code. 1995. Continuous acoustic emission monitoring, Section V, Article 13. New York: American Society of Mechanical Engineers. S. 251 - 271.

Aufort, P., Bimont, G., Chau, T. H., Fournier, I., Morihat, P., Souchois, T. & Cordier, G. 1991. On line fatiguemeter: a large experiment in French nuclear plants. Nuclear Engineering and Design, vol. 129, nro 2, s. 177 - 184.

Bakirov, M. B. 1996. New specimen-free natural diagnostics method of the metal state of the equipment of the nuclear power plants. VNIIAES:n (All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plant Operation) kokoama ja lähettämä lähdeaineisto sisältäen artikkeleita ja kaupallista julkaisumateriaalia. 40 s.

Bartos, A. L., Green, R. E. Jr. & Ruud, C. O. (Eds.) 1996. Nondestructive characterization of materials VII. Parts I & II. Proceedings of the Seventh International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials held in Prague, Czech Republic, June 1995. Switzerland: Transtec Publications Ltd. 880 s.

Bedrosian, G., Chari, M. V. K., Fealey, J. A. & Sober, T. J. 1988. On-Line Eddy-Current Crack Monitoring. Palo Alto, CA, USA: Electric Power Research Institute (EPRI). 88 s. (EPRI CS-5694).

Blaszkiwicz, M. 1996. The development of nondestructive evaluation (NDE) for monitoring the embrittlement in nuclear reactor pressure vessels. Teoksessa: Bartos, A. L., Green, R. E. Jr. & Ruud, C. O. (eds.). Nondestructive Characterization of Materials VII. Parts I & II. Proceedings of the Seventh International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials held in Prague, Czech Republic, June 1995. Switzerland: Transtec Publications. S. 9 - 15.

Coulter, J. E., Sherlock, T. P. & Stevens, D. M. 1987. Acoustic emission monitoring of cracks in fossil fuel boilers. Palo Alto, CA, USA: Electric Power Research Institute (EPRI). 96 s. (EPRI CS-5264).

Ehrnstén, U., Lagerström, J., Laitinen, T., Piippo, J. & Saario, T. 1996. Characterization of material behaviour by means of simultaneous monitoring of water chemistry and of surface film electric resistance. VIIth International Conference of Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, 13 - 17 October 1996, Bournemouth, UK. London: British Nuclear Energy Society. S. 277 - 279.

Electric Power Research Institute. 1995. Report Summary: Acoustic emission monitoring of high-energy steam piping: Volume 1: Acoustic emission monitoring guidelines for hot reheat piping. Palo Alto, CA, USA: Electric Power Research Institute (EPRI). 3 s. (EPRI TR-105265-VI).

Green, R. E. Jr. 1990. Nondestructive evaluation of materials. Annual Review of Materials Science, vol. 20, s. 197 - 217.

Griesbach, T. J., Riccardella, P. C. & Gosselin, S. R. 1991. Application of fatigue monitoring to the evaluation of pressurizer surge lines. Nuclear Engineering and Design, vol. 129, nro 2, s. 163 - 176.

Harris, D. O., Delhia, D. D. & Mamaros, T. C. 1984. Acoustic emission from crack growth in steam turbine rotor steels. Palo Alto, CA, USA: Electric Power Research Institute (EPRI). 332 s. (CS-3428).

Hutton, P. H., Kurtz, R. J., Friesel, M. A., Skorpik, J. R. & Dawson, J. J. 1991. Acoustic emission/flaw relationship for inservice monitoring of LWRs. Richland, WA, USA: Pacific Northwest Laboratory. 117 s. (NUREG/CR-5645, PNL-7479).

Hutton, P. H., Friesel, M. A. & Dawson, J. J. 1993. Continuous AE crack monitoring of a dissimilar metal weldment at Limerik Unit 1. Richland, WA, USA: Pacific Northwest Laboratory. 88 s. (NUREG/CR-5963, PNL-8844).

Höller, P., Hauk, V., Dobman, G., Ruud, C. O. & Green, R. E., (eds.) 1989. Nondestructive characterization of materials. Proceedings of the 3rd International Symposium, Saarbrücken, FRG, 3 - 6 October, 1988. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 892 s.

Iloa, R. 1992. Painevesireaktorin paineastiaterästen säteilyhaurastumisen ja toipumisen mekanismit ja niiden tutkiminen. Diplomityö. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, kone-tekniikan osasto. 84 s.

Keinänen, H., Rintamaa, R., Öberg, T., Sarkimo, M., Talja, H. & Saarenheimo, A. 1990. Evaluation of catastrophic failure risk in pressure vessels. Results of pressure vessel test with a large vessel (HC2-test). Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 62 s. (VTT Tutkimuksia 708.)

Macleod, I. D., Rowley, R., Beesley, M. J. & Olley P. 1991. Acoustic monitoring techniques for structural integrity. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 129, nro 2, s. 191 - 200.

Morgner, W. 1994. Fundamentals of nondestructive materials characterization. *NDT & E International*, vol. 27, nro 5, s. 263 - 268.

Mäkelä, K., Buddas, T. & Laitinen, T. 1996. The effect of the new feed water collector design on the impurity distribution in one of the Loviisa 2 unit steam generators. VIIth International Conference of Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, 13 - 17 October 1996, Bournemouth, UK. London: British Nuclear Energy Society. S. 364 - 370.

Neuvonen, A., Rajamäki, P., Kohopää, J., Simpanen, P. & Nurkkala, P. 1995. Management of reactor coolant system integrity at the Loviisa NPP. Proceedings of the International Topical Meeting on VVER Safety, Prague, Czech Republic, 21 - 23 September, 1995. Bern: European Nuclear Society. 4 s.

Nichols, R. W. 1991. A state-of-the-art review of continuous monitoring and surveillance techniques in relation to reactor pressure circuit integrity. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 50 s. ISBN 92-826-0523-X.

O'Brien, E. W. 1996. Developments in remote crack detection and monitoring by acoustic emission for aircraft applications. Teoksessa: Rogers, L. M. & Tscheliesnig, P. (eds.). 22nd European Conference on Acoustic Emission, Aberdeen, 29 - 31 May 1996. UK: Univation Ltd at The Robert Gordon University. S. 165 - 169.

Pitkänen, J. 1991. Uusien materiaalien ominaisuuksien määrittäminen NDT-menetelmin. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 164 s. (VTT Tiedotteita 1275.)

Sarkimo, M. 1994. Suurten paineastioiden eheyden analysointi akustisella emissiolla. Lisensiaatintyö. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto. 105 s.

Scruby, C. B. 1987. An introduction to acoustic emission. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 20, August, s. 946 - 953.

Scruby, C. B., Beesley, M. J., Stacey, K. A. & Buttle, D. J. 1989. Continuous monitoring by acoustic emission measurements. UK: AEA Technology, Harwell Laboratory. 13 s. + liitt. 11 s. (AERE R 13644).

Sison, M., Duke, J. C. Jr., Clemena, G. & Lovez, M. G. 1996. Acoustic emission: A tool for the bridge engineer. *Materials Evaluation*, vol. 54, nro 8, s. 888 - 900.



Streicher, V. J. 1991. Acoustic monitoring systems - System concept and field experience. Nuclear Engineering and Design, vol. 129, nro 2, s. 151 - 162.

Thibault, S. E., Andrianopoulos, C. D. & Walejeski, W. E. Jr. 1994. NTD system prevents catastrophic failures. Power Engineering, vol. 98, April, s. 37 - 40.

Wach, D. 1991. Vibration, neutron noise and acoustic monitoring in German LWRs. Nuclear Engineering and Design, vol. 129, nro 2, s. 129 - 150.

Verbrugghe, E. & Cherfaoui, M. 1993. Acoustic emission inspection of defects under coating in nozzles of vessels - Fatigue study on a coated steel. Journal of Acoustic Emission, vol. 11, nro 1, s. 1 - 4.

Weiss, J. M. & Mayo C. W. 1991. Recommendations for effective loose parts monitoring. Nuclear Engineering and Design, vol. 129, nro 2, s. 121 - 127.