



VTT VALMISTUSTEKNIikka

Tutkimusraportti
BVAL73-001063

**AKUSTINEN EMISSIO JA SEN KÄYTTÖ KONEIDEN JA
LAITTEIDEN MONITOROINNISSA JA DIAGNOSTIIKASSA**

Jari Halme, Risto Parikka, Jyrki Tervo

Espoo 5.11.2001



A Työraportti	
B Julkinen tutkimusraportti	X
Tutkimusraportti luottamuksellinen saakka	

Raportin nimi AKUSTINEN EMISSIO JA SEN KÄYTTÖ KONEIDEN JA LAITTEIDEN MONITO- ROINNISSA JA DIAGNOSTIIKASSA	
Toimeksiantaja/rahoittaja ja tilaus pvm/nro TEKES, Teollisuus, VTT	Raportin numero BVAL73-001063
Projektin nimi Koneiden ja laitteiden kunnon ja käyttöolosuhteiden monito- rointi ja diagnostiikka	Suoritteen numero V9SU00882
Laati(t) Jari Halme, Risto Parikka, Jyrki Tervo	Sivujen/ liitesivujen lukumäärä 28 / -
Avainsanat Akustinen emissio, kunnonvalvonta	
Tiivistelmä Akustinen emissio tarkoittaa materiaalissa etenevää transienttia elastista aaltoa, minkä aiheuttaa nopea energian vapautuminen jossakin paikallistettavassa kohteessa tai kohteissa. Emissio voi aiheutua useista eri materiaalissa Akustista emissiota voidaan käyttää koneiden kunnonvalvonnassa useiden, toisistaan riippumattomien vikojen ja vaurioiden tarkkailuun. Akustisen emission käyttökohteita ovat esimerkiksi putkisto- ja venttiilivuotojen monitorointi, särönkasvun seuranta, sekä laakerien heikosta voitelusta johtuvien metallisten kosketuksien havainnointiin. Akustisen emission avulla voidaan joissakin tapauksissa tehostaa koneiden kunnon valvontaa. Tosin kaikissa tilanteissa menetelmällä ei saada etua esimerkiksi värähtelymittauksiin nähden. Tällainen on esimerkiksi laakerien kunnonvalvonta, vaikkakin käyntiin lähdön kaltaisissa tilanteissa jolloin pyörimisnopeudet ovat alhaisia menetelmästä todennäköisesti on etua.	
Allekirjoitukset, Espoo 5.11.2001	
Kenneth Holmberg Tutkimuspäällikkö	Jari Halme Tutkija
Tarkastanut	
Jakelu (asiakkaat ja VTT):	
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.	

Alkusanat

Tämä raportti on laadittu Käyttövarmuus kilpailutekijänä teknologiaohjelman metalliteollisuuden osuuden menetelmäprojektissa M9 – Koneiden ja laitteiden kunnan ja käyttöolosuhteiden monitorointi ja diagnostiikka. Projektin rahoitukseen ovat osallistuneet TEKES, pilottiyrietykset, seurantayrietykset ja VTT. Pilottiyrietykset ovat Metso Paper, Rautaruukki Raah Steel ja Lillbacka. Projektin seurantayrietykset ovat Metso Minerals ja Outokumpu Pori Copper.

Espoo, 5.11.2001

Tekijät

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO.....	4
2	AKUSTISEN EMISSION PERIAATE	4
2.1	AKUSTISEN EMISSION AALTOTYYPIT	4
2.2	AALLON HEIJASTUMINEN RAJAPINNASTA	6
2.3	2.3 AALLON KULKEUTUMINEN RAJAPINNAN LÄPI	8
2.4	AALLON KULKEUTUMINEN RAJAPINTOJEN VÄLISSÄ.....	8
2.5	PINNAN IMPULSSISTA HERÄTETTY AALTO	9
2.6	SIGNAALIN VAIMENEMINEN RAKENTEISSA.....	9
3	ANTURIT AKUSTISEN EMISSION MITTAUKSISSA.....	11
3.1	ANTURIN HERKKYYS.....	11
3.2	MITTAUSKOHTTEEN ASETTAMAT VAATIMUKSET.....	12
3.3	MITTAUSPINNAN PUHDISTUS	13
3.4	AE-ANTURIN KIINNITYS.....	13
3.5	KIINNITYKSESSÄ KÄYTETTYJEN LIITTIMIEN VAIKUTUS MITATTA- VIIN AALTOIHIN	16
3.6	ANTUREIDEN KIINNITYSTAVAN VAIKUTUS TAAJUUSALUEESEEN.....	17
3.7	AALTOJOHTIMET.....	18
4	AKUSTISEN EMISSION SOVELLUKSET KUNNONVALVONNASSA.....	19
4.1	LAAKERIEN KUNNONVALVONTA.....	19
4.2	SÄRÖN SEURANTA.....	20
4.3	VUOTOJEN MONITOROINTI	21
4.4	MUITA SOVELLUTUKSIA.....	23
5	YHTEENVETO.....	23
6	KIRJALLISUUSVIITTEET.....	25

1 JOHDANTO

Akustinen emissio tarkoittaa materiaalissa etenevää transienttia elastista aaltoa (= ääniaalto), minkä aiheuttaa nopea energian vapautuminen jossakin paikallistettavassa kohteessa tai kohteissa (Tomsic, 2000). Emissio voi aiheutua useista eri materiaalissa tapahtuvista ilmiöistä tai materiaaliin kohdistuvista ulkopuolisista iskumaisista herätteistä. Materiaalissa tapahtuvia ilmiöitä voivat olla esimerkiksi tietyissä metalleissa esiintyvät mekaanisia kuormituksia aiheuttavat faasitransformaatiot, särön kasvu tai muu plastinen deformaatio, sekä esimerkiksi komposiiteissa tapahtuvat kuitujen murtumiset. Koska akustinen emissio on ääniaaltojen liikettä, on akustisen emission eteneminen materiaalissa esitettävissä normaalien elastisuusteorian kaavojen mukaan.

Akustista emissiota voidaan käyttää koneiden kunnonvalvonnassa useiden, toisistaan riippumattomien vikojen ja vaurioiden tarkkailuun. Akustisen emission käyttökohteita ovat esimerkiksi putkisto- ja venttiilivuotojen monitorointi, särönkasvun seuranta, sekä laakerien heikosta voitelusta johtuvien metallisten kosketuksien havainnointiin.

Akustisen emission mittausalue on tavallisesti satojen kilohertsien laajuinen ulottuen maksimissaan noin yhden megahertsin taajuuteen asti. Vastaavasti värähtelymittausten mittausalue ulottuu 25 kHz ja ultraäänen aina 100 kHz asti. Siten on selkeää että akustisen emission mittauksilla on mahdollista havaita korkeataajuuksisia ilmiöitä, joita ei muilla edellä mainituilla menetelmillä muuten voida havaita. Lisäksi esimerkiksi suodattamalla signaalista matalataajuisia komponentteja pois voidaan taustakohinaa vähentää ja havainnoitava ilmiö saadaan selkeämmin esille.

Akustisen emission havaitseminen eli signaalin voimakkuus riippuu aaltotyypistä, mitattavasta väliaineesta sekä rajapintojen aiheuttamista heijastuksista. Akustista emissiota mittaavien antureiden asennuksessa vaaditaan tietämystä kiinnityksessä tarvittavista erityisratkaisuksista sekä käytetyn mittaustavan ja anturin vaikutuksista mitattavaan signaaliin. Lisäksi mm. korkeiden prosessilämpötilojen johdosta mittavat signaalit joudutaan usein siirtämään johdintangon välityksellä pois epäedullisista prosessiolosuhteista.

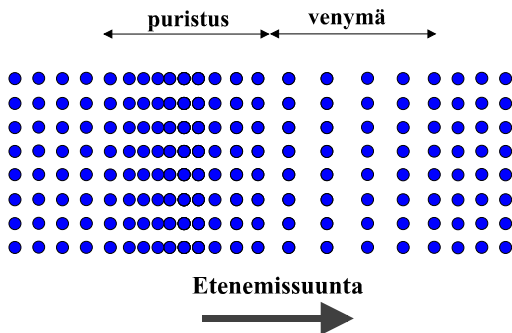
Tässä raportissa käsitellään akustisen emission mittaustekniikkaa sekä sovellutuskohteita koneiden kunnonvalvonnassa. Raportti on kirjoitettu julkisiin lähteisiin nojautuen.

2 AKUSTISEN EMISSION PERIAATE

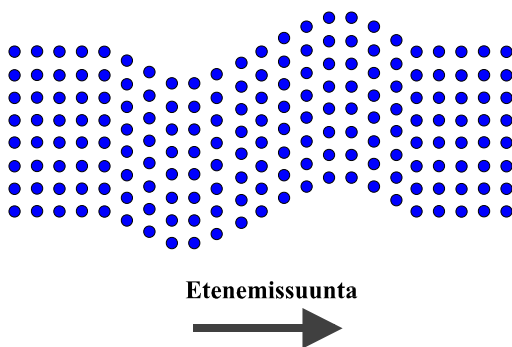
2.1 AKUSTISEN EMISSION AALTOTYYPIT

Materiaalissa etenevien elastisten aaltojen yhtälöt löytyvät useimmista elastisuusteoriaa käsittelevistä teoksista, esimerkiksi Timoshenko ja Goodier (. Mikä tahansa elastinen parametri voidaan laskea jos tunnetaan kahden parametrin arvo – esimerkiksi kimmo-

kertoimen ja Poissonin vakion avulla voidaan laskea bulkkivakio, leikkausvakio ja niin edelleen. Tätä käytetään hyväksi myös kyseisten vakioiden mittauksessa – tarkimmat elastisuusvakioiden mittaukset perustuvat materiaalissa etenevien pitkittäisten ja poikittaisten aaltojen liikkeeseen. Nämä kaksi aaltomuotoa esiintyvät aina (Kuvat 1 ja 2). Pitkittäis- ja poikittaisaalto etenevät homogeenisissa materiaaleissa kaikkiin suuntiin vakionopeuksilla pitkittäisaallon ollessa nopeampi.



Kuva 1. Pitkittäissuuntainen aaltoliike väliaineessa (Egle, 1987).

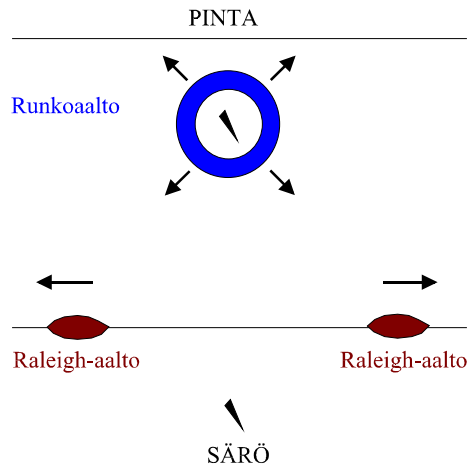


Kuva 2. Poikittaissuuntainen aaltoliike väliaineessa (Egle, 1987).

Kun jostakin paikallisesta emissiolähteestä syntynyt aaltomuoto etenee pallomaisesti laajentuen herätekohdasta poispäin säilyy aaltorintaman energia vakiona, mutta leviää edetessään laajemmalle pinnalle. Jotta energia pysyisi vakiona, aaltomuodon amplitudi pienenee rintaman edessä herätekohdasta poispäin. Pitkittäis- tai poikittaissuuntaisen aaltomuodon saavuttaessa materiaalin pinnan voi syntyä Rayleighin aalto, mikä on toinen tavallinen pinta-aalto. Pinta-aalloiksi luokitellaan myös Lambin aallot (Timoshenko ja Goodier, 1970; Viktorov, 1967).

Pinta-aallot etenevät siis materiaalin pinnassa. Aallot syntyvät kun pitkittäis- tai poikittaisaalto kohtaa materiaalin pinnan. Rayleighin aalto esiintyy esimerkiksi maanjäristysten yhteydessä aiheuttaen maan värähtelyä vielä suhteellisen kaukana järistyksen keskipisteestä. Vaikkakin Rayleighin aalto etenee nopeasti pinnassa niin sen ominaisuuksiin kuuluu, että se vaikenee nopeasti syvemmälle materiaaliin mentäessä. Itse asiassa Rayleighin aaltokin koostuu kahdesta epähomogeenisesta aallosta – pitkittäisestä ja poikittaisestä – mitkä etenevät rajapintaa pitkin samalla nopeudella mutta vaimenevat syvyyden funktiona eri tavalla. Rajapinnassa aallot kumoavat toistensa aiheuttamat jännitykset.

Lambin aalto esiintyy ohuissa levymäisissä rakenteissa ja siirtymät tapahtuvat sekä aallon etenemisen suuntaan että levyn normaalia vastaan kohtisuoraan. Sekä Lambin että Rayleighin aallolla on teknisiä sovellutuksia esimerkiksi materiaalien pintojen ultraäänitarkastuksessa (Viktorov, 1967). Rayleighin aallon synty ja eteneminen kiinteän aineen rajapinnalla on esitetty kuvassa 3 (Hopwood, 1987).



Kuva 3. Rayleighin aallon synty väliaineessa (Hopwood, 1987).

Edellä mainittu koskee kaikkea ääntä materiaalissa ja niin muodoin myös akustista emissiota. Taulukossa 1 on esitetty tyypillisimpien elastisuusvakioiden sekä pinta-aaltojen yhtälöt. Kaavoissa c_1 on pitkittäisaallon nopeus, c_2 on poikittäisaallon nopeus, ρ on materiaalin tiheys ja suhdeluku α riippuu Poissonin vakiosta.

Taulukko 1. Elastisuusvakioiden yhtälöt ja niiden parametrit (Timoshenko ja Goodier, 1970).

Parametri	Kaava	
Pitkittäimoduli	$C_1 = \rho \cdot c_1^2$	(1)
Bulkkimoduli	$B = C_1 - \frac{4}{3}G$	(2)
Kimmokerroin	$E = \frac{3GB}{C_1 - G}$	(3)
Leikkausmoduli	$G = \rho \cdot c_2^2$	(4)
Poissonin vakio	$\nu = \frac{E}{2G} - 1$	(5)
Rayleighin aallon nopeus	$c_3 = \alpha \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \alpha \cdot c_2$	(6)
Rayleighin vakio	$\alpha^6 - 8\alpha^4 + \left(3 - \frac{1-2\nu}{1-\nu}\right)\alpha^2 - 16 \left[1 - \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\right] =$ $1 - \alpha^2 \left[\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}\right] > 0$ $1 - \alpha^2 > 0$	(7)

Taulukossa 2 on esitetty aaltotyyppien keskimääräisiä nopeuksia valikoiduissa materiaalityypeissä. Taulukon materiaalit on oletettava tyyppinsä keskimääräisiksi edustajiksi, sekä materiaalin rakenne on oletettava ideaaliseksi. Käytännön materiaaleissa erilaiset suotautumat, erkaumat ja muut vastaavat materiaalivirheet aiheuttavat huomattaviakin poikkeamia mitatuissa nopeuksissa.

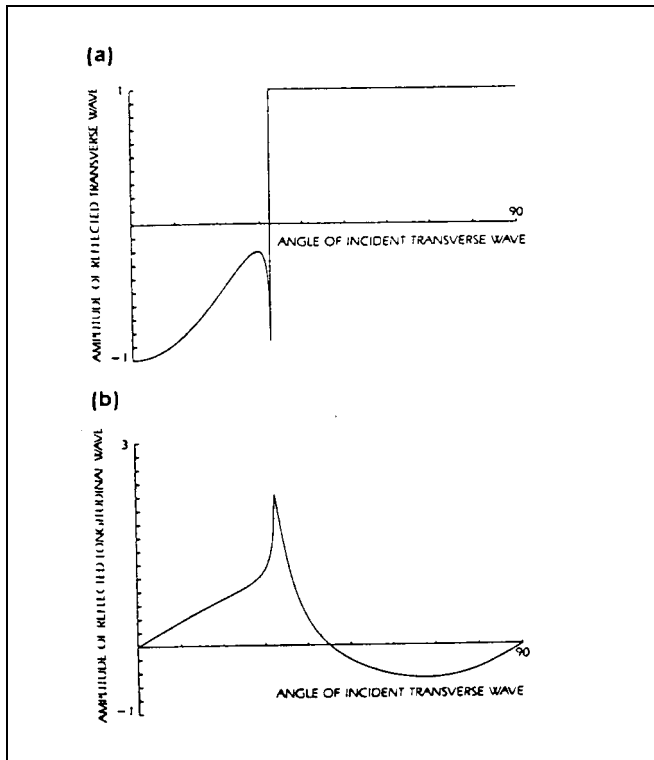
Taulukko 2. Aaltotyyppien normaaleja nopeuksia tyypillisessä teräksessä, valuraudassa ja alumiinissa ideaalisen homogeenisen materiaalin tapauksessa.

Materiaali	Aaltotyyppien nopeus [m/s]		
	Pitkittäisuuntainen aalto (longitudinal wave)	Poikittaissuuntainen aalto (transverse wave)	Rayleighin aalto (Rayleigh wave)
Teräs	5 900	3 200	3 000
Valurauta	5 000	3 000	2 700
Alumiini	6 300	3 100	2 900

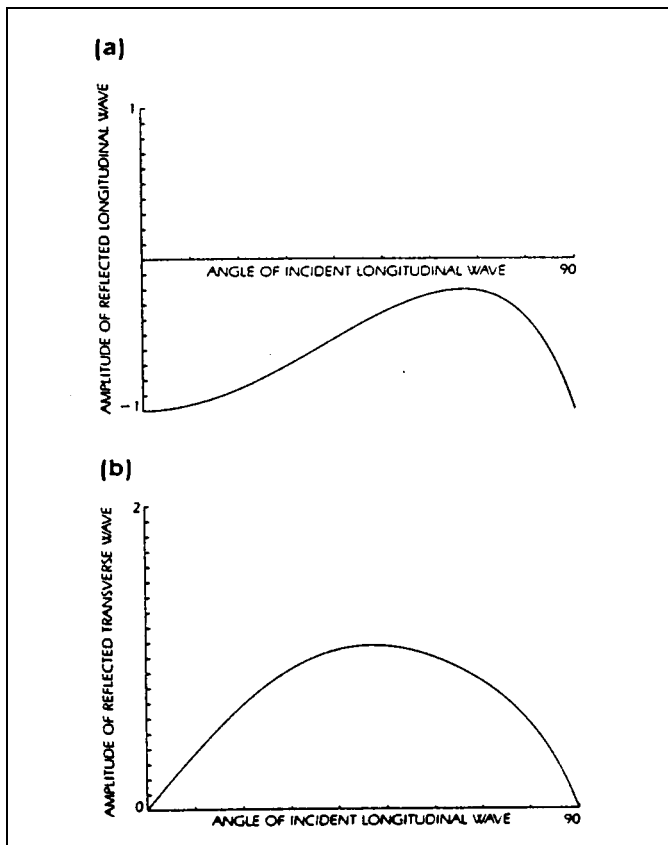
2.2 AALLON HEIJASTUMINEN RAJAPINNASTA

Aallon kohdatessa väliaineen rajapinnan, sen suunta muuttuu tai se voi heijastua takaisin. Aaltomuodon tyyppi voi myös muuttua. Kuvassa 4 on esitetty satunnaisen poikittaisen aaltomuodon heijastumisen aiheuttama aaltomuotojen amplitudin muutos suhteessa tuloaaltoon. Tulokset on esitetty tulokulman funktiona rajapinnan normaaliin nähden. Kuvan 4 tapauksessa käytetty Poissonin luku on 0.3. Kuvassa 5 on esitetty vastaava pitkittäiselle aaltomuodolle. Kuvista näkyy alkuperäisen aaltomuodon jakautuminen pitkittäiseksi ja poikittaiseksi aaltomuodoksi rajapinnassa. Snellin laista seuraa, että heijastuneen pitkittaisen aaltomuodon hei-

jastuskulma on suurempi kuin poikittaisen, sillä pitkittäisen aaltomuodon nopeus väliaineessa on suurempi kuin poikittaisen aaltomuodon. (Egle, 1987)



Kuva 4. Satunnaisen poikittaisen aallon heijastuminen rajapinnasta teräksellä (Egle, 1987).



Kuva 5. Satunnaisen pitkittäisen aallon heijastuminen rajapinnasta teräksellä (Egle, 1987).

2.3 2.3 AALLON KULKEUTUMINEN RAJAPINNAN LÄPI

Rajapinnassa, jossa kaksi kiinteää ainetta kohtaavat toisensa, osa saapuvasta aaltomuodosta heijastuu takaisin ja osa kulkeutuu rajapinnan läpi toiseen väliaineeseen. Kohtisuoraan rajapintaa vastaa kulkevan aallon heijastuneen ja läpi kulkeneen tehon määrä riippuu kaavoissa (8) ja (9) esitetyistä suhteista. (Egle, 1987)

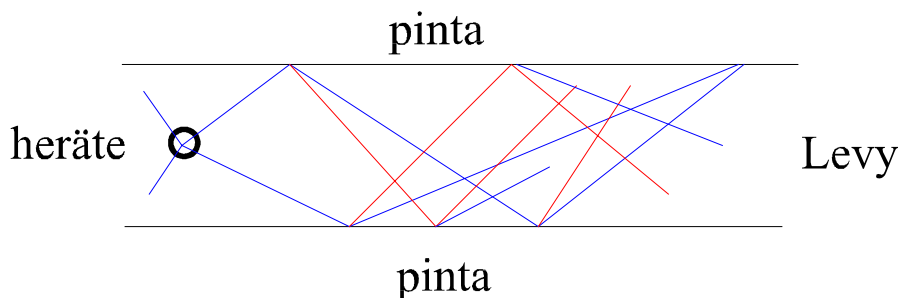
$$\frac{P_{Ri}}{P_{Oi}} = \frac{(\rho_1 v_{1i} - \rho_2 v_{2i})^2}{(\rho_1 v_{1i} + \rho_2 v_{2i})^2} \quad (8)$$

$$\frac{P_{Ti}}{P_{Oi}} = \frac{4\rho_1 v_{1i} \rho_2 v_{2i}}{(\rho_1 v_{1i} + \rho_2 v_{2i})^2} \quad (9)$$

missä indeksin i paikalle voidaan sijoittaa joko pitkittäisen tai poikittaisen aaltomuodon tiedot, P_O on kohtisuoraan rajapintaa vastaan kulkevan alkuperäisen aallon teho, P_R ja P_T ovat heijastuneen ja läpi kulkeneen aallon teho. Indeksit $_1$ ja $_2$ kuvaavat aallon tulo- ja sen vastapuolen väliaineita, ρ on väliaineen tiheys ja v on aaltomuodon nopeus väliaineessa – parametria ei pidä sekoittaa Poissonin vakioon samasta merkinnästä huolimatta. Tuloa ρv sanotaan aaltomuodon akustiseksi impedanssiksi väliaineessa. Kaavasta (8) nähdään, että ainoastaan silloin kun rajapinnan molemmilla puolilla akustinen impedanssi on yhtä suuri, aalto voi ylittää rajapinnan ilman heijastumisia. Koska aallon kokonaisenergia säilyy niin alkuperäisen aaltomuodon teho on yhtä suuri kuin heijastuneen ja läpi kulkeutuneen aaltotehon summa.

2.4 AALLON KULKEUTUMINEN RAJAPINTOJEN VÄLISSÄ

Käytännön rakenteessa on reunat rakenteen molemmilla puolilla, joista alkuperäinen aalto heijastuu jatkaa etenemistään rakenteessa. Heijastuksessa alkuperäinen aaltomuoto (pitkittäinen tai poikittainen) jakautuu kahteen eri aaltomuotoon, joiden heijastuskulmat ovat erilaiset (ks. edellä). Syntyneet aaltomuodot jatkavat matkaansa väliaineessa, kunnes tulevat vastakkaiselle rajapinnalle, joista kumpikin aaltomuoto heijastuu taas kahtena uutena aaltomuotona. Näin levyrakenteeseen syntyy nopeasti suuri joukko aaltoja jotka kulkevat heijastuen rajapintojen välillä (kuva 6). [1]



Kuva 6. Aallon kulkeutuminen rakenteessa.

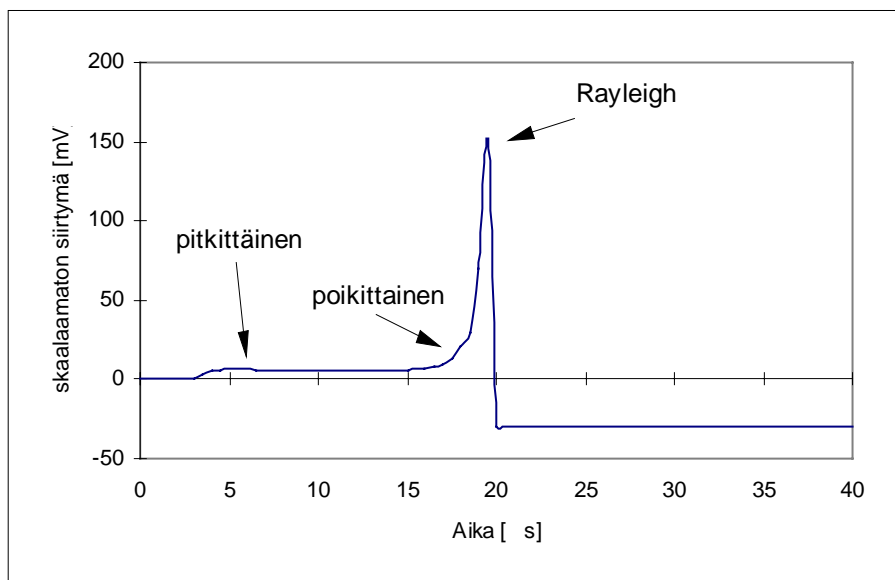
Aaltokimpun nopeus asettuu pitkittäisen ja poikittaisen aaltoliikkeen nopeuden väliin. Moodin nopeudelle, joka kuljettaa suurimman osan aaltokimpun energiasta voidaan laskea likimääräinen arvo kaavalla (10).

$$v_p = v_t \sqrt{\frac{2}{1-v}} \quad (10)$$

Mittauspisteeseen saapuu ensimmäisenä pitkittäisen aaltomuodon herätekohdasta suorinta reittiä tullut aalto. Ensimmäisenä saapuvan aallon amplituditaso on yleensä kuitenkin pieni verrattuna myöhemmin saapuviin aaltoihin.

2.5 PINNAN IMPULSSISTA HERÄTETTY AALTO

Väliaineen pinnan kevyt impulssimainen heräte synnyttää väliaineeseen korkeataajuisen aaltomuodon, joka etenee rakenteessa ja voidaan mitata. Impulssi voidaan synnyttää esimerkiksi painamalla 0.3 - 0.5 mm lyijytäytäkynä mitattavaa pintaa vasteen voimalla, joka riittää katkaisemaan ulkona olevan lyijyn. Katkeamisesta syntynyt impulssi herättää rakenteessa etenevän aaltovasteen. Kyseistä herätteenantotapaa on käytetty myös akustisen emission mittaamiseen liittyvien mittausjärjestelmien kalibroinnissa. Kuvassa 7 on esitetty impulssimaisesta herätteestä syntyneen aallon teoreettinen, pintaa vastaan kohtisuora siirtymä mittauspisteessä. Mittauspisteeseen ensimmäisenä saapuu ensin pitkittäissuuntainen paineaalto, joka etenee rakenteessa nopeimmin. Pitkittäissuuntaisen aallon saapuminen on näkyvä kuvassa signaalin ensimmäisenä nousukohtana. (McBride et al., 1987)



Kuva 7. Impulssin synnyttämän pitkittäis- ja poikittaissuuntaisen sekä Rayleigh-aallon pintaa vastaan kohtisuora siirtymä mittauspisteessä (McBride et al., 1987).

Seuraavaksi mittauspisteeseen saapuu poikittaissuuntainen aaltomuoto, joka näkyy kuvassa signaalin seuraavana muutoskohtana ennen jyrkkää nousua. Pitkittäis- tai poikittaissuuntaisen aaltomuodon kulkiessa ja heijastuessa mittavassa rakenteessa, ne synnyttävät väliaineen pinnalla etenevän intensiivisen Rayleigh-aallon (Rayleigh waves). Rayleigh-aalto näkyy kuvassa terävänä huippuna, joka saapuu mittauskohtaan poikittaissuuntaisen aaltomuodon jälkeen.

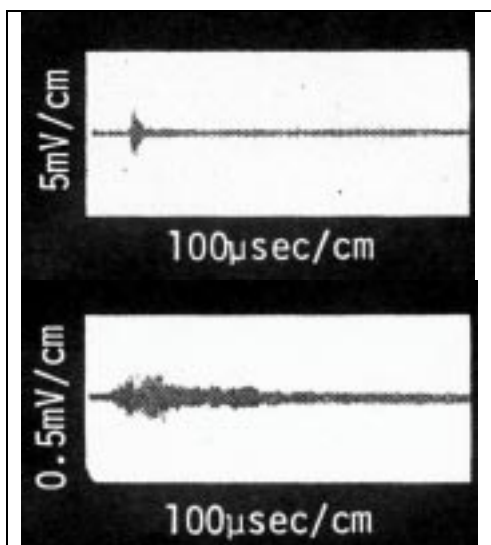
Rayleigh-aallolla siirtymän huippuarvo on tyypillisesti noin 20 - 30 dB suurempi kuin muiden aaltomuotojen huippuarvot (Hopwood, 1987).

2.6 SIGNAALIN VAIMENEMINEN RAKENTEISSA

Edetessään väliaineessa siirtynyt värähtely ei säily muuttumattomana vaan sen muoto ja amplitudi muuttuvat. Tyypillisesti värähtelyn amplitudi vaimenee. Signaalin vaimenemiseen on useita eri syitä, joista tyypillisimpiä ovat geometrinen vaimeneminen, signaalin hajonta, taituminen ja sironta rakenteessa sekä energiatilojen muutoksista johtuvat syyt.

Geometrisessa vaimenemisessa värähtelysignaali etenee syntypisteestä pois päin kaikkiin suuntiin jakautuu edetessään yhä laajemmalle alueelle. Koska värähtelyn energiamäärä säilyy vakiona, värähtelyn amplitudi vaimenee signaalin edetessä. Riittävän etäällä värähtelysignaalin syntypisteestä väliaineen sisällä etenevän runkoaallon amplitudi supistuu suoraan suhteessa etäisyyteen. Pinta-aallon (Rayleigh wave) amplitudi supistuu suhteessa etäisyyden neliöjuureen kun signaali on riittävän etäällä mittauspisteestä. Geometrinen vaimennuksella ei ole vaikutusta aaltoihin, jotka kulkeutuvat esimerkiksi ohuissa tangoissa ja jänteissä. (Egle, 1987)

Signaalin dispersio (hajonta) on ilmiö, joka aiheutuu etenemisnopeuden taajuusriippuvuudesta värähtelyaalloilla, jotka etenevät tietyissä väliaineissa ja rakenteissa. Dispersiosta johtuvaa vaimenemista voi tapahtua, kun aaltotyyppi etenee kiinteässä väliaineessa, jossa signaalin aallonpituus on verrannollinen väliaineen paksuuteen tai sen kerrannaiseen. Riippuen etenevästä aaltotyypistä (pitkittäis-, poikittaissuuntainen tai Rayleigh-aalto) sekä tarkasteltavasta taajuusalueesta dispersion vaimentava vaikutus signaaliin voi olla huomattava tyypillisellä akustisen emission mittaamiseen käytetyllä taajuusalueella. (Egle, 1987) Kuvassa 8 on esitetty esimerkki dispersion vaikutuksesta 3.2*45.7*914.4 mm:n alumiinitangossa etenevään värähtelysignaaliin, joka herätettiin antamalla impulssi tangon toisessa päässä. Vaste luettiin mittauspisteistä, jotka olivat määrätyn etäisyyden päässä herätepisteestä. Sekä impulssin antamiseen että vasteen lukemiseen käytettiin identtisiä akustisen emission antureita, joiden resonanssitaajuus oli 1 MHz. Heräte- ja vastesuunta olivat kohtisuorassa tangon pintaa vastaan.



Kuva 8. Dispersio alumiinitangossa . Kuvan koko on skaalattu eikä vastaa enää kuvassa esitettyjä pituusarvoja. (Eagle ja Brown, 1975)

Kuvassa 8 yläpuolella heräte- ja vastepisteen väli oli 40.6 mm ja alapuolella 228.6 mm. Kuvasta nähdään, että signaalin edetessä vastepisteiden välillä signaalin amplitudin huippuarvo pienenee dispersion vaikutuksesta noin kymmenesosaansa. Samalla signaaliin kesto pitenee taajuussisällön pysyessä muuttumattomana. (Eagle ja Brown, 1975)

Väliaineessa etenevä aalto on vuorovaikutuksessa väliaineessa olevien epäjatkuvuuskohtien ja rajapintojen kanssa. Tyypillisiä epäjatkuvuuskohtia ovat mm. reiät, kapeat raot ja ontelot sekä halkeamat ja terävät reunat. Aallon kohdatessa rajapinnan aalto heijastuu rajapinnasta joko osittain tai kokonaan. Osa aallon energiasta heijastuu todellisissa rakenteissa olevista rajapinnoista rakenteen kaikkiin suuntiin. Tätä ilmiötä kutsutaan aallon sironnaksi. Osa aallon energiasta, joka kulkee epäjatkuvuuskohdan ylitse taipuu epäjatkuvuuskohdan varjopuolelle. Tätä kutsutaan puolestaan aallon taipumiseksi. (Egle, 1987)

Sekä aallon sironta että taipuminen epäjatkuvuuskohdassa johtaa tyypillisesti signaalin amplitudiarvon vähenemiseen mittauspisteessä. Jossakin erikoistapauksissa, jossa signaalit interferoivat keskenään sopivasti nämä voivat johtaa myös amplitudiarvojen kasvuun. Eräs tyypillinen sirontaa aiheuttava tekijä akustista emissiota mitattaessa on mitattavan rakenteen pinnanlaatu. Esimerkiksi valurautarakenteissa karkea pintarakenne aiheuttaa huomattavaa sirontaa MHz-alueella olevalle signaalille. Sironnasta ja taipumisesta johtuva signaalin vaimeneminen on erittäin vaikeaa mallintaa. Siksi vaimenemisen vaikutus usein on syytä mitata ennen varsinaisia mittauksia. (Egle, 1987)

Edellä esitetyissä kohdissa aallon mekaaninen energia säilyy muuttumattomana jos väliaine on kiinteää ja elastinen. Todellisissa rakenteissa näin ei aina ole. Mekaaninen energia voi muuttua lämpöenergiaksi tai hävitä plastisiin muodonmuutoksiin, säröjen kasvupurskeisiin ja rajapintojen välisiin liikkeisiin. Nämä kaikki vaikuttavat siihen kuinka paljon signaalin amplitudi vaimenee väliaineessa. (Egle, 1987)

Todellisissa mittaustilanteissa tarkasteltavilla taajuusalueilla signaalin vaimeneminen on usein merkittävää. Esimerkiksi vuodon herättämä akustinen signaali vaimenee tyypillisesti huomattavasti vuotopaikan ja mittauspisteen välisellä matkalla erityisesti korkeilla MHz-luokkaa olevilla (Streicher, 1991). Normaalisti vaimeneminen on syytä mitata todellisissa rakenteissa ja kohteissa suoritettavilla testimittauksilla.

3 ANTURIT AKUSTISEN EMISSION MITTAUKSISSA

Mittauspisteeseen kiinnitetty anturi havainnoi aaltopulssit ja muuttaa ne sähköisiksi signaaleiksi. Anturi ja mittaustjärjestelmä täytyy kalibroida vastaamaan todellista aaltotasoa. Mittaustjärjestelmän kalibroinnissa tulee huomioida kolme eri asiaa, jotka kaikki vaikuttavat järjestelmän hyvyyteen havaita saapuvat aaltomuodot (Eitzen, 1987):

- mitattavan pinnan siirtymävektori on kolmiulotteinen, mutta anturin ulostulo on skalaari
- anturi ja sen kiinnitys vaikuttavat siirtymävektoriin
- anturi peittää mittauspisteessä otsapintaa vastaavan pinta-alan ja siirtymävektori on sekä ajan että tämän pinta-alan funktio

3.1 ANTURIN HERKKYYS

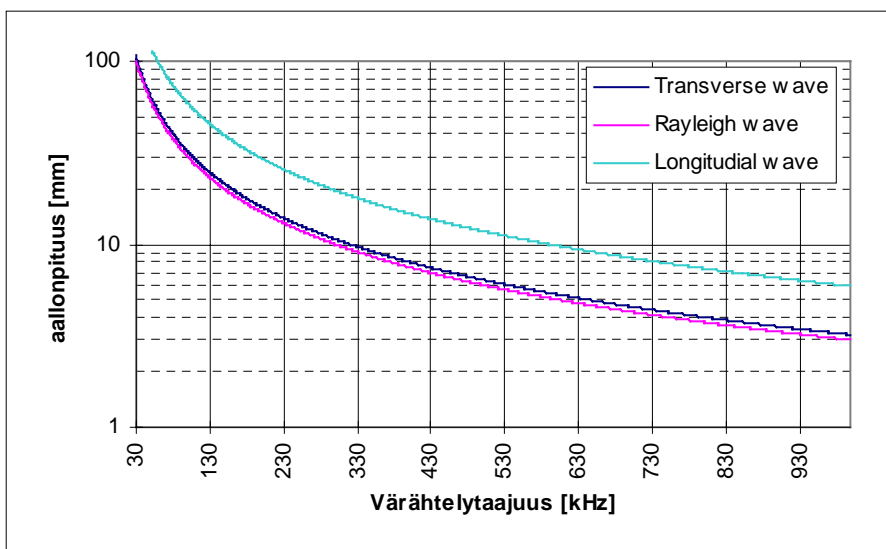
Ensimmäiseen kohtaan vaikuttaa anturin herkkyys eri mittaussuunnille. Yleisesti oletetaan, että anturi herkkyys on mittaussuunnassa 100% ja muissa suunnissa 0%. Käytännössä antureiden herkkyys myös muihin kuin päämittaussuuntaan ei ole nolla, jolloin myös muun kuin halutun suuntaiset liikkeet integroituvat mittaustulokseen. (Eitzen, 1987)

Mittattavaan rakenteeseen kiinnitetty mittaasanturi kuormittaa mittauspintaa ja toimii merkittävänä paikallisena jäykistäjänä erityisesti ohuilla rakenteilla. Mittauspisteeseen etenevän aallon, anturin kiinnityksen ja sen rakenteen pintaan aiheuttaman kuormituksen keskinäinen yhteisvaikutus muokkaavat mittauspisteessä syntyvää liikettä taajuuden funktiona. Tätä on usein vaikea mallintaa.

Herätelähteestä syntyneen ja mitattavassa rakenteessa etenevien aaltomuotojen aallonpituus riippuu aallon etenemisnopeudesta ja taajuudesta (kaava 10).

$$L = \frac{v_i}{f} \tag{11}$$

missä L on aallonpituus, v_i aallon nopeus ja f aallon taajuus. Indeksillä i paikalle voidaan sijoittaa tarkasteltava aaltomuoto. Mitattavat aaltomuodot ovat käytännössä vain harvoin puhtaasti harmonisia ja deterministisiä. Signaaliin on usein integroitunut satunnaisia häiriöitä ja kohinaa satunnaisista lähteistä ja signaalin informaatio on jakautunut laajalle taajuuskaistalle. Akustisen emission mittaamisessa signaalien käyttökelpoiseksi taajuuskaistaksi on vakiintunut 30 kHz - 1 MHz sovelluskohteesta ja ratkaisusta riippuen [4 ja 5]. Pitkittäissuuntaisilla aalloilla, jotka etenevät mitattavassa rakenteessa kohtisuorassa mittauspintaan vastaan, ei anturin mittauspinnan halkaisijalla ole vaikutusta siihen, kuinka hyvin anturilla voidaan havaita aallon kantama taajuusinformaatio. Sen sijaan mittauspinnan suunnassa etenevillä poikittaisilla aalloilla anturin mittauspinnan halkaisija aaltorintaman suunnassa vaikuttaa siihen, kuinka korkeita taajuuksia anturilla voidaan luotettavasti mitata. Isompi pinta-alaisilla antureilla mitattava taajuusalue jää pienemmäksi kuin pienempi pinta-alaisilla antureilla (Eitzen, 1987). Tämä johtuu siitä, että anturin halkaisijan ja aallonpituuden ollessa yhtä suurina, anturin toisen pään noustessa toinen pää laskee. Tällöin anturin havaitsema keskimääräinen liike ja ulostulo ovat nollia. Kuvassa 9 on esitetty taajuuden funktiona poikittaisen, pitkittämän ja Rayleigh-aallon aallonpituus teräksessä.



Kuva 9. Aaltomuotojen aallonpituus teräksessä taajuuden funktiona

Kuvasta 9 nähdään, että sovelluksissa, jossa tarvitaan 1 MHz:n taajuusalueelle ulottuvia mitauksia, täytyy anturissa olevan mittauspään halkaisija olla alle 3 mm. Käytännössä anturin anturin halkaisijan on syytä olla pienempi. Teräksellä 3 mm anturihalkaisija voi toimia luotettavasti alle 0.5 MHz:n taajuuksilla. Joillakin perinteisillä, pietsosähköisillä anturityypeillä anturin halkaisijasta johtuva taajuusalueen tyvistymisongelma on ratkaistu konstruomalla anturin kiinnityspintaa pieni, pinnasta hieman nouseva uloke. Ulokkeen halkaisija on pienempi kuin varsinainen anturin ulkoinen halkaisija (Brüel&Kjær, 1984).

3.2 MITTAUSKOHTEN ASETTAMAT VAATIMUKSET

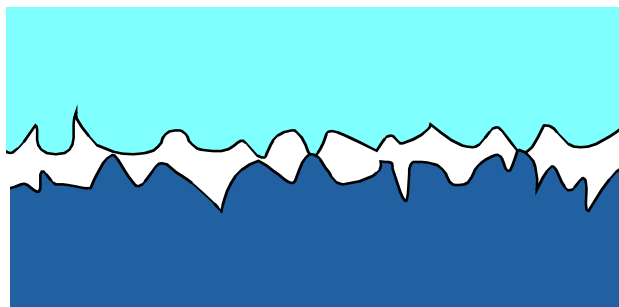
Asennettavat anturit tulee olla sopivia mittauskohteeseen. Mitattavat taajuudet ja herkkyudet, materiaalien yhteensopivuus, mittausympäristön lämpötila, värähtelyt, epäpuhtaudet tulee huomioida ennen sopivan anturin valintaa/suunnittelua. Akustisista herätelähteistä syntyvät mielenkiintoisimmat taajuudet ovat korkeita taajuuksia, jolloin muut alempana olevat tyypilliset koneissa ja laitteissa syntyvät häiriölähteet voidaan suodattaa pois (Sarkimo, 1990). Kunnonvalvonnassa akustisen emission mittaamiseen perustuvaa havainnointia on käytetty irto-osien monitorointiin putkistoissa, särönkasvun seurantaan sekä neste- tai kaasuvuotojen monitorointiin. Irto-osien monitoroinnissa käytetty taajuusalue on alhaisin. Taajuusalue on 1 - 20 kHz riippuen diagnosoitavien irto-osien koosta. Särönkasvusta, korroosiopartikkeleiden irtoamisesta ja säröjen reunamien hankauksesta aiheutuvien ilmiöiden monitoroinnissa yleisesti käytetty taajuusalue on 100 -1000 kHz (Brüel&Kjær, 1984). Turbulenttisen vuodon monitoroinnissa taajuusalue on tyypillisesti edellistä hieman alempi, noin 100 - 600 kHz. Mittausympäristön lämpötila riippuu voimakkaasti sovelluskohteesta.

Parhaimpaan onnistumistodennäköisyyteen päästään mittaamalla vuodon synnyttämää akustista emissiota (Sarkimo, 1998). Vuodon herättämä akustinen emissio on luonteeltaan jatkuvaa, jolloin heräte on helpommin tunnistettavissa kuin esim. kertaluonteinen särön kasvuhypäys. Luonnollisesti akustisen emission anturin on oltava riittävän herkkä havaitsemaan pienetkin akustisen emission lähteistä syntyneet värähtelyilmiöt. Anturin akustisen emission havainnointikyky riippuu taajuuskaistasta ja sen yksittäisten taajuuksien signaalikohinasuhteesta. Laboratorio-olosuhteita vastaavissa olosuhteissa, joissa taustakohina on hallittua, voidaan perinteisillä pietsosähköisillä antureilla havaita 1 MHz:n taajuudella noin 10^{-14} m:n liikkeen synnyttämä aalto (Wadley, 1987).

3.3 MITTAUSPINNAN PUHDISTUS

Anturin kiinnityspinnan ja mittauspisteen pinnan välinen laatu ja tasaisuus vaikuttavat siihen kuinka hyvin eri akustisen emission lähteistä saapuvat aallot kulkeutuvat mitattavasta rakenteesta anturille. KytKentäpinta tulee puhdistaa ennen liitosta pinnoitteista, jotka voivat heikentää akustisen emission kulkeutumista anturille. Akustiseen energiaan heikentäviä pinnoitteita ovat mm. maalit, eristeet, irtonaiset työstöjäljet, hitsausroiskeet ja pinnan hapettumat (ASTM E 650, 1997). Pinnoitteiden poisto voidaan tehdä mm. hiomalla pinta puhtaaksi, jolloin samalla voidaan pienentää pinnan epätasaisuuksia. Kuvassa 10 on esitetty suurennettu kuva kytKentäpinnan epätasaisuudesta.

Anturi



Mittauspisteen pinta

Kuva 10. Suurennettu kuva anturin ja mittauspinnan välisestä kontaktista

Kuvasta 10 nähdään, että anturi kytkeytyy pinnan huippujen kautta mitattavaan rakenteeseen. Pinnan epätasaisuuksista johtuen vain osa mitattavan rakenteen akustisesta energiasta kulkeutuu anturille huolellisenkin pinnan puhdistuksen ja pinnan hionnan jälkeen (Brüel&Kjær, 1984).

3.4 AE-ANTURIN KIINNITYS

Akustisen emission jännitysaallot ovat korkeataajuista, usein matala-amplitudista värähtelyä, joka vaimenee nopeasti mekaanisiin rajapintoihin. Tämän vuoksi hyvä mekaaninen kytkentä anturin ja mitattavan pinnan välillä on välttämätön akustisen emission mittaamiseksi. Ilman hyvää liitosta/kytkentää vain osa pieni osa akustisesta energiasta kulkeutuu anturille. Anturin ja mitattavan pinnan välistä kytkentää voidaan parantaa käyttämällä anturin ja pinnan välillä kytkentäainetta tai kytkentäaineena toimivaa liimaliitosta. Sovelluksissa, jossa kytkentäainetta tai kytkentäaineena toimivaa liimaa ei voida käyttää mittausympäristön luonteen vuoksi (mm. korkea lämpötila, puhtausvaatimukset jne) voidaan anturin ja mittauspisteen välillä käyttää kuivaa liitosta. Kuivaa liitosta käytettäessä pitää käyttää sopivaa kokeellisesti hyväksi havaittua puristusvoimaa anturin ja mittauspinnan välillä. Karkeana yleistyksenä voidaan tällöin vaatia, että puristuspainetta ylittää 0.7 MPa (ASTM E 650, 1997).

Kytkeäaineet

Mittauspintojen välissä olevien epätasaisuuksien vaikutuksen pienentämiseksi pintojen välissä tulee käyttää jotakin kytkentäainetta, joka välittää mitattavan rakenteen akustisen energian mahdollisimman hyvin anturille. Käyttämällä nestemäistä kytkentäainetta pintojen välissä saadaan noin 30-kertaa parempi kytkentä kuin ilman kytkentäainetta. (Eitzen, 1987) Kytkentäaine täyttää liitettävien pintojen epätasaisuudet niin, että kytkentä kantaa koko pinnallaan eikä vain muutamien pinnan huippujen kohdalla. Pintojen epätasaisuudet täyttävänä kytkentäaineena voi olla lähes mikä tahansa nestemäinen aine, joka soveltuu mittauskohteen ympäristön asettamiin vaatimuksiin. Kytkentäaineen valinnassa on huomioitava kohteen lämpötila, paine, vaikuttavat kaasut ja nesteet. Korkeissa käyttölämpötiloissa kytkentäaine voi muuttua epästabiiliksi ja matalissa lämpötiloissa jäätyä tai jähmettyä/irrota.

Vesi, öljy, glyseriini ja erilaiset rasvat ovat tyypillisimpiä kytkentäaineita. Tavalliset voiteluravat ovat usein ominaisuuksiltaan riittäviä. Silikonipohjaiset rasvat kestävät hyvin korkeita

lämpötiloja. Niitä voidaan käyttää 250 C° asti ja niitä on käytetty menestyksellisesti erityisesti resonaattoriantureilla (Brüel&Kjær, 1984).

Antureilla, jotka mittaavat kohtisuoraan mittauspintaa vastaan olevia liikkeitä, kytkentäaineen viskositeetti ei ole merkittävä tekijä akustisen energian siirtymisen kannalta. Pinnan tangentialisuuntaisen liikkeen mittaamisessa kytkentäaineen viskositeetin vaikutus on merkittävä. Antureilla, joilla mitataan pinnan tangentialisuuntaisia liikkeitä, kytkentäaineen viskositeetti on syytä valita mahdollisimman suureksi (ASTM E 650, 1997).

KytKentäainekerroksen paksuus vaikuttaa mittauspisteen kytkennän ominaistajuuteen. Ominaisuuteen vaikuttaa kytkentäaineen ja pintojen kosketuksen välinen jäykkyys sekä mitataan anturin massa (kaava 12).

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (12)$$

Kaava (12) on voimakkaasti yksinkertaistettu esitys ominaistajuudesta. Kaavassa omega on kytkennän ominaistajuus, k pintojen välisen kosketuksen ja kytkentäaineen muodostaman kytkennän jäykkyys ja m anturin massa. Kaavasta (12) nähdään, että liitoksen ominaistajuus kasvaa, kun jäykkyys kasvaa anturin massa pysyessä vakiona. Kytkentäaineen tyypistä riippumatta levittämällä kytkentäainetta ohut, vain pinnan epätasaisuudet peittävä kerros saadaan kytkennästä mahdollisimman jäykkä ja kytkennän ominaistajuudesta mahdollisimman korkea. Kytkentäaineen levitys anturin mittauspinnalla tapahtuu laittamalla pieni tippa käytettävää kytkentäainetta anturin mittauspinnan keskiosaan ja painamalla anturi mittauspisteeseen, jolloin kytkentäaine leviää tasaisesti pintojen välille.

KytKentäaineen käytön kannalta on oleellista, että anturin pysyy tiukasti paikoillaan eikä liiku pois mittauspisteestä. Anturin pysyvyys mittauspisteessä ja kytkentäaineen päällä voidaan varmistaa mekaanisilla puristimilla. Riittävänä puristusvoimana pidetään yleensä voimaa, joka vastaa kevyttä sormen painallusta. Toinen tapa varmistaa liitoksen pysyvyys on käyttää liimaliitosta.

Adheesio

Mittaavan anturin ja mittauspisteen toisiinsa kiinnittävä liimaliitos (adhesive) toimii kytkettävien pintojen välillä sekä mekaanisena liitoksena että pinnat kytkevänä kytkentäaineena. Mittauksissa useimmin käytettävissä olevat liimat kantavat sekä pinnan normaali- että tangentialisuuntaisia voimia ja värähtelyjä. Liimaliitoksen valinnassa on huomioitava mittaushetken ympäristöolosuhteet. Korkeissa lämpötiloissa voidaan käyttää mm. pysyviin asennuksiin tarkoitettua Cyanolit liimaa 202. Sitä voidaan käyttää noin 200 C° asti (Brüel&Kjær, 1984). Muut huomioon otavat ympäristötekijät ovat mm. syövyttävät nesteet ja rasvat.

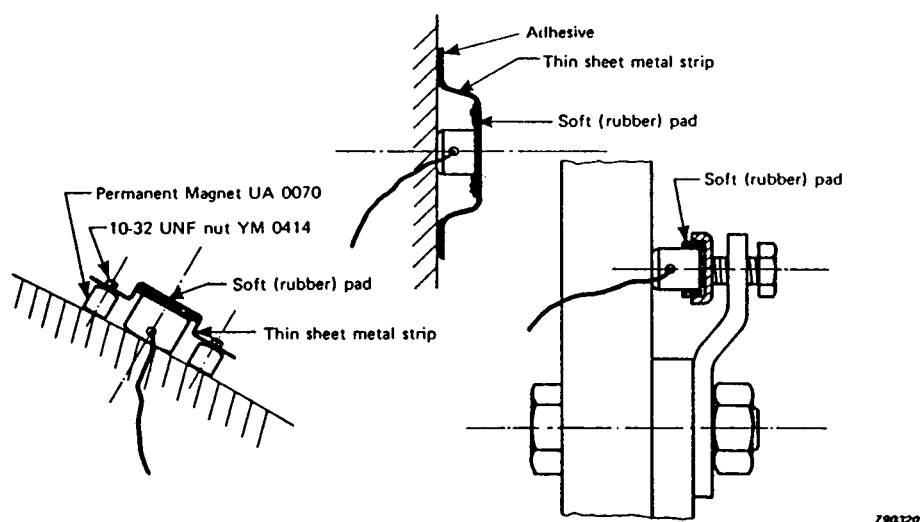
Liimaliitos ei sovellu kaikkiin mittaushetkiin. Kohteissa, joissa mitattavan kohteen pinnassa tapahtuu rakenteen kuormituksista ja jännityksistä aiheutuvia suuria muodonmuutoksia anturin ja mittauspisteen välinen liimaliitos voi murtua. Samoin mitattavan pinnan, liitoksen ja/tai välillä tapahtuva erisuuri, lämpölaajenemisesta johtuva liike voi rikkoa pintojen välisen liitoksen tai anturin. (ASTM E 650, 1997) Liitoksen murruttua menetetään pintojen välinen tiivis kytkentä. Tällöin mitattavassa kohteessa kulkeva akustinen energia ei pääse enää kulkeutumaan anturille ja mittaaminen on hyödytöntä.

Liimaliitosta käytettäessä tulee huomioida liitosten pysyvyys. Liimaamalla kiinnitetyn anturin irrottaminen voi olla työlästä ja saattaa rikkoa sekä anturin että aiheuttaa vaurioita mitattavan

rakenteen pintaan (ASTM E 650, 1997). Jos halutaan, että samaa anturia voidaan käyttää myöhemmin muissa mittaushetkeissä tai -pisteissä, tulee käyttää muita kiinnitysmenetelmiä.

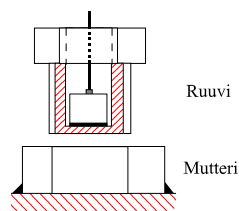
Ulkoiset ruuvipuristimet ja liittimet

Muita kuin liimaliitoksia käytettäessä, tulee akustisen emission anturi kiinnittää mittauspisteeseen ulkoisilla ruuvipuristimilla tai liittimillä (Brüel&Kjær, 1984). Ulkoinen puristin pitää anturin paikallaan. Käytettäessä ulkoisia ruuvipuristimia tai liittimiä, akustisen emission anturi painetaan alustana toimivaa mittauspintaa vasten muutaman Newtonin voimalla, mikä vastaa kevyttä sormen painallusta. Korkeimmilla puristusvoimilla anturin kuorirakenne saattaa vääntyä ja aiheuttaa epätasaisen puristuksen, joka vaikuttaa perinteisen, pietsosähköisen anturin kiteeseen ja vääristää mittaussignaalin. Kuvassa 11 on esitetty erilaisia mekaanisia liityntä-ratkaisuja, joilla voidaan kiinnittää anturi rakenteeseen.



Kuva 11. Eräitä tapoja kiinnittää anturi ulkoisilla liittimillä mittaushetkeeseen.

Kuvassa 11 vasemmalla puolella oleva anturi on kiinnitetty kestopagneettien ja metallilevyjen avulla mitattavaan kohteeseen. Magneettista kiinnitystä käytettäessä mitattava kohteen pinta on oltava magneettinen. Metallilevy on kiinnitetty kuvan magneetteihin ruuveilla. Keskellä kuvaa 11 anturin kiinnitys on toteutettu liimaamalla anturia painava metallilevy mitattavaan pintaan. Oikealla anturin kiinnitys on toteutettu ruuvipuristimella, joka on vipuvarren päässä. Vipuvarsi on kiinnitetty ruuvilla ja mutterilla mitattavaan rakenteeseen.



Kuva 12. Anturin kiinnitys mittaushetken ympärillä olevan tukirakenteen sisälle.

Kuvassa 12 anturi on kiinnitetty mittaushetken ympärillä olevan tuki/suojarakenteen sisälle liimaamalla se ensin ruuvien sisälle työstettyyn pintaan. Ruuvi voidaan kiertää joustavasti rakenteisiin hitsattuihin muttereihin, jotka pitävät anturin paikallaan.

Perinteisten, pietsosähköisten akustista emissiota mittaavien antureiden mittauspinta on sähköisesti eristetty mittauskiteestä sähkömagneettisten häiriöiden pienentämiseksi. Käytettäessä ulkoisia liittimiä tai ruuvipuristimia tulee huomioida erityisesti silloin kun anturin ulkoinen kuorirakenne on sähköisesti johtavaa ainetta, että anturin liittimen puoleinen pinta on sähköisesti eristetty esimerkiksi ohuella kumityynyllä. (Wadley, 1987)

Ulkoisia ruuvipuristimia ja liittimiä käytettäessä on anturin ja mittauspisteen välisten pintojen välissä aina käytettävä kytkentäainetta, kun se vain on mahdollista.

3.5 KIINNITYKSESSÄ KÄYTETTYJEN LIITTIMIEN VAIKUTUS MITATTAVIIN AALTOIHIN

Liittimen valinnassa on huomioitava sekä monitoroitava akustisen emission lähde että liittimen vaikutus mitattavaan rakenteeseen. Liittimet, jotka ovat kiinnitetty mekaanisesti mitattavaan kohteeseen jäykistävät paikallisesti mitattavaa kohdetta ja saattavat muuttaa saapuvaa akustista energiaa tai pahimmillaan estää energian pääsyn anturille. Pinta-aallon (Rayleigh wave) havainnoinnissa mittauspistettä ympäröivä hitsisauma tai ruuvikierre (ks. kuva 12) vaikuttaa heikentävästi anturille saapuvaan energian määrään. (ASTM E 650, 1997) Tärkeimmissä monitorointisuunnissa kannattaa varmistaa akustisen emission esteetön pääsy mittauspisteeseen. Esteetön pääsy voidaan varmistaa joko liimaliitoksella tai käyttämällä vipuvarsia suunnissa, jotka ovat vähemmän mielenkiintoisia.

Järjestelmissä, jossa anturin mittausjohto pääsee värähtelemään vapaasti mitattavaa pintaa vasten, saattavat mittausjohdon liikkeestä rakenteeseen kohdistuneet impulssit vääristää mitaustuloksia. Tämän vuoksi kiinnityksessä käytettyjen liittimien tulisi tarjota tuki myös anturin mittausjohdolle. (ASTM E 650, 1997)

Mittauskohteessa käytetyn ulkoisen liittimen tulee olla materiaaliltaan neutraali ja galvaanisessa jännitesarjassa lähellä sekä mitattavaan rakenteeseen että anturiin nähden. Näin mittauspisteessä voidaan ehkäistä materiaalien sähköisistä jännitepotentiaalieroista johtuva korrosio. Toinen vaihtoehto on laittaa liitettävien osien väliin sähköeristys, joka estää galvaanisen virran.

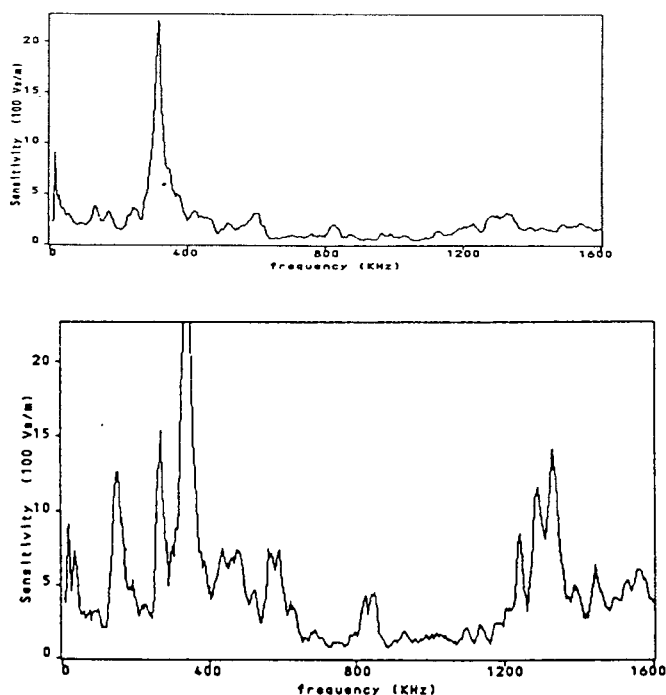
3.6 ANTUREIDEN KIINNITYSTAVAN VAIKUTUS TAAJUUSALUEESEEN

Antureiden kiinnitystapa vaikuttaa sekä mitattavassa rakenteessa etenevään akustiseen energiaan että sen taajuusinformaatioon. Perinteiset, pietsosähköiset anturit ovat olleet resonaattorityyppisiä antureita, joissa anturin taajuusvaste ei ole ollut lineaarinen. MEMS-anturitekniikalla voidaan valmistaa akustista emissiota mittaavia antureita, jotka ovat takaisinkytkettyjä, ja joilla on leveä lineaarinen taajuusalue. Anturin koko dynaamista taajuus-aluetta tarkasteltaessa tulee huomioida kiinnitystavan vaikutus mitattujen signaalien taajuusinformaatioon.

Anturin massa, kytkentäpintojen laatu, kytkentäaineen kytketyminen ja paksuus, kytkentävoiman suuruus sekä mittauspisteen rakenne vaikuttavat huomattavasti todelliseen taajuus-

vasteeseen. Kuvassa 13 on esitetty huolellisesti ja puutteellisesti toteutetun liimaliitoksen vaikutus akustisen emission anturilta mitattuun herkkyyteen taajuuden funktiona. Molemmissa tapauksissa liimana käytettiin cyanoakrylaattia.

Kuvassa 13 ylempänä on huolellisesti ja alempana puutteellisesti toteutettu liitos. Kuvasta nähdään, että ero liitosten välillä on merkittävä. Huolellisesti kiinnitetyillä liimaliitoksilla saadaan melko hyvä toistettavuus eri mittausten välille jos eri mittauksissa käytetään samaa, jäykän sidoksen muodostava liimatyyppiä (esimerkiksi cyanoakrylaattia). Pehmeillä liimatyypeillä sekä hartseilla toistettavuus on huonompi. (Higo ja Inaba, 1989)



Kuva 13. Huolellisesti ja puutteellisesti toteutetun liimaliitoksen vaikutus akustista emissiota mittaavan anturin herkkyyteen taajuuden funktiona (Higo ja Inaba, 1989).

Akustisen emission mittauksissa usein käytetyn ruuvipuristin- tai magneettiliitoksen taajuusvaste on myös hyvin voimakkaasti sovelluskohtainen eikä sille voida antaa yleispätevää ominaistajuutta. Taajuusvaste riippuu edellä mainittujen kohtien lisäksi puristusvoimasta ja kytkentäpinnan pinta-alasta sekä puristusosan/vipuvarren mekaanisista ominaisuuksista ja kiinnityksestä. Näiden syiden vuoksi on usein vaikeaa verrata keskenään eri yhteyksissä kerättyjä mittauksia sekä niissä havaittuja värähtelytasoja.

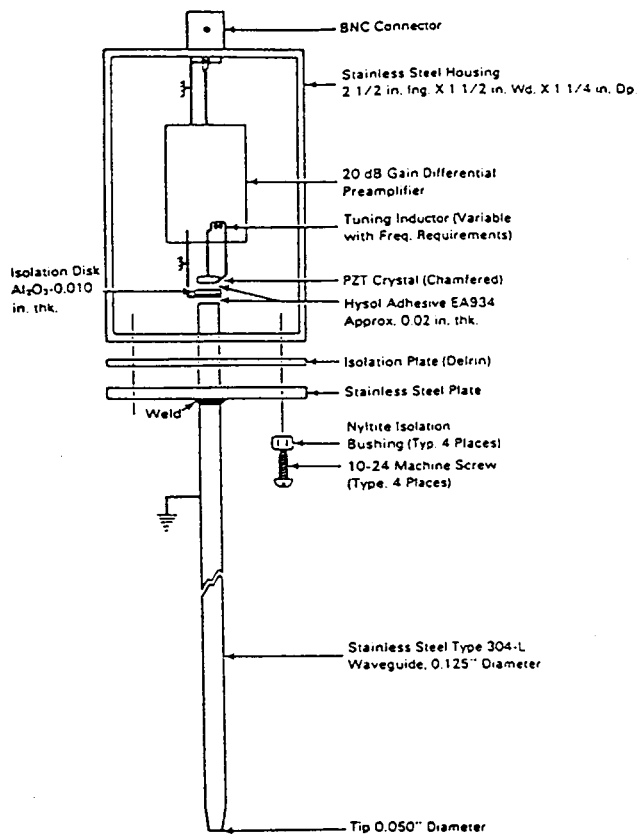
3.7 AALTOJOHTIMET

Mittauskohteissa, joissa ympäristöolosuhteet ovat epäsuotuisia anturin kytkennälle suoraan mitattavan rakenteen pintaan, voidaan käyttää aaltojohtimia. Aaltojohtimilla siirretään mitauspisteen akustinen energia rakenteesta anturille, joka on suotuisemmassa paikassa. Mittauskohteen ympäristöolosuhteista korkea lämpötila on tyypillisin syy käyttää aaltojohtimia. Aaltojohtimet ovat rakenteeltaan ohuita metallitankoja, joiden pituuden vaikutus mitattavan akustisen signaalin vaimenemiseen on suhteellisen pieni. Esimerkiksi teräksellä 100 - 300 kHz:n taajuusalueella vaimennus on 0.3 - 3 dB pituusmetriä kohti (Hardy et al., 1989).

Aaltojohtimien käyttö lisää rajapintojen lukumäärä, joiden läpi akustisen energian täytyy kulkeutua ennen kuin se voidaan havainnoida. Rajapinnat vaimentavat akustista energiaa ja vääristävät akustista aaltoa. Aaltojohtimet tulee asentaa niin, että johtimen varsi ei kosketa mitään rakennetta tai materiaalia, jotka voivat vaimentaa johtimessa kulkevaa akustista signaalia (ASTM E 650, 1997).

Kuvassa 14 on esitetty eräs kuumia kohteita varten suunniteltu aaltojohdin, jonka päähän asennettiin pietsosähköinen kide, joka koteloitiin yhdessä esivahvistimen kanssa. Rakenteen avulla saadaan anturiosat riittävän etäälle kuumasta mittauspisteestä.

Kuvan 14 ratkaisussa aaltojohdin on valmistettu ruostumattomasta terästangosta, jonka paksuus on noin 3.3 mm. Johdin kytketään kuivana ilman kytkeäaineita. Johtimen mittauspää on ohennettu ja sen halkaisija on 1.3 mm. Johtimen ohuella mittauspäällä saavutetaan riittävä puristusaine pienelläkin puristusvoimalla. Anturielementti on sähköisesti eristetty mittauspisteestä. (Sarkimo, 1998)



Kuva 14. Kuumiin kohteisiin soveltuva aaltojohdin.

4 AKUSTISEN EMISSION SOVELLUKSET KUNNONVALVONNASSA

4.1 LAAKERIEN KUNNONVALVONTA

Akustinen emissio on materiaalissa etenevää aaltoliikettä, joka syntyy energian vapautuessa tai muuntuessa toiseksi (esimerkiksi liike-energian muuttuminen värähtelyenergiaksi). Mitatastaajuus on yleensä yli 100 kHz, jolloin mekaanisista koneenelimistä peräisin oleva matalataajuinen melu jää pois. Koska signaalin syntymekanismi ei riipu kierrosluvusta, voidaan akustisella emissiolla mitata myös hitaasti pyörivien laakerien kuntoa. Metallipintojen kosketuksesta aiheutuu sarja akustisia pulsseja, joiden energiasisältö riippuu pyörimisnopeudesta, laakerimateriaalista, emissiopulssin lähteestä ja kulkureitistä.

Laakerien vikataajuudet (Li ja Ma, 1997) voidaan esittää ulkokehälle (f_u), sisäkehälle (f_s) ja vierintäelementeille (f_k). Muut kaavoissa esiintyvät suureet ovat: n on vierintäelementtien määrä, f_r on laakerin pyörimistaajuus, β on kuulan ja kehän välinen kosketuskulma, D_k on kuulan halkaisija ja D_v on vierintähalkaisija.

$$f_u = \frac{n}{2} f_r \left[1 - \frac{D_k}{D_v} \cos \beta \right] \quad (13)$$

$$f_s = \frac{n}{2} f_r \left[1 + \frac{D_k}{D_v} \cos \beta \right] \quad (14)$$

$$f_k = \frac{D_k}{D_v} f_r \left[1 + \left(\frac{D_p}{D_v} \right)^2 \cos \beta \right] \quad (15)$$

Tunnettaessa laakerin vikataajuudet (pyörimisnopeus, vierintäelinten määrä ja laakerin dimensiot) voidaan jaksollisten akustisten pulssien taajuudesta päätellä laakerivian sijainti.

Enveloping-tekniikka (Li ja Li, 1995) on osoittautunut hyödylliseksi havaittaessa heikkoja säännöllisesti toistuvia signaaleja. Laakerien osien resonanssitaajuudet heräävät ja ne erotetaan suodattamalla taustamelusta. Signaalin korkeataajuisia komponentteja tarkastellaan aikatasossa ja sille tehdään FFT-muunnos. Tällöin spektriin jäävät vain laakerin sykäystaajuuskomponentti kerrannaisineen. Laakerivian ilmetessä laakerille ominaisten vikataajuuksien intensiteetti kohoaa.

Akustisen emission avulla on kyetty havaitsemaan mm. vierintäpinnan alla olevia väsymissä-röjä (Yoshioka, 1992) sekä pinnassa olevia lohkeamia (Yoshioka et al., 1999). Lisäksi on kyetty havaitsemaan voitelurasvassa olevien epäpuhtauksien määrän lisääntyminen ja siten voitelun heikkeneminen (Miettinen ja Leinonen, 1999; Miettinen, 2000). Ilmiö näkyy akustisen emission tason kasvuna.

4.2 SÄRÖN SEURANTA

Murtumien ydintyminen ja eteneminen synnyttävät purkaustyyppistä epäjatkuvaa voimakas-amplitudista emissiota. Seuraavassa käsitellään vaihtosuuntaisen kuormituksen aiheuttaman väsymismurtuman tunnistamisessa käytettäviä metodeja. Murtuman aiheuttamien emissio-pulssien luonne on samantyyppinen sekä vaihtosuuntaisessa että yksisuuntaisessa kuormituk-sessa.

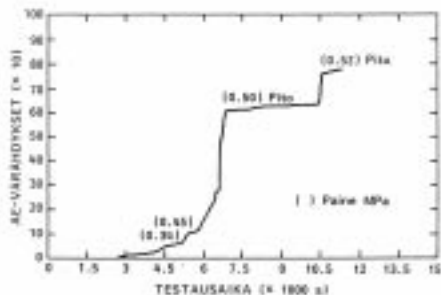
Jaksottaisen ylikuormituksen menetelmässä mittaus suoritetaan periodisesti kuormittamalla kappaletta ajoittain käyttökuormitusta suuremmalla kuormituksella. Virheitä sisältävään kap-paleeseen kohdistetaan yksisuuntainen kuormitus σ siten, että jännitysintensiiteetikijä $K_p = \alpha\sigma(a)^{0.5}$. Yhtälössä α on kappaleen geometriasta riippuva kerroin, σ on vaikuttava kuormitus ja a on alkuperäisen murtuman pituus. Ensimmäisen kuormituksen σ jälkeen kappale asetetaan tietyksi ajaksi käyttöolosuhteisiin, jonka jälkeen suoritetaan jälleen kuormitus tasolla n mitaten samalla akustisen emission aktiviteettia. On osoitettu, että emissiopulssien lukumäärä N voidaan esittää jännitysintensiiteetin funktiona muodossa $N = Ak_p^m$. Jos murtuma ei ole kasvanut käyttökuormituksen aikana, K_p on sama kuin ensimmäisessä mittauksessa. Jos mur-tumassa taas on tapahtunut kasvua, tekijä a on alkuperäistä suurempi. Kun rakennetta kuor-mitetaan jännityksellä σ , myös jännitysintensiiteetikerroin K_p on suurempi. Näin ollen tapah-tuu uutta muodonmuutosta, ja käyttökuormituksen ja koekuormituksen välillä emittoituu akustisia pulsseja. Emission ilmeneminen kuormitusten välillä on siis murtuman kasvun la-dullinen mitta, joten absoluuttisten arvojen määrittäminen edellyttää etukäteistietoa tutkitta-vasta materiaalista. Suorittamalla väsytykokeita ja jaksottaisia ylikuormituksia mitaten sa-malla emission aktiviteettia, voidaan määrittää vakiot yhtälölle, jolla väsymismurtuman kas-vunopeus voidaan laskea. Väsymismurtuman kasvunopeus riippuu jännitysintensiiteetikijä-stä seuraavasti:

$$Da/dn = B\Delta K_p^n \quad (16)$$

, missä da/dn = murtuman kasvu yhden kuormituskierron aikana
 K_p = jännitysintensiiteetikijä
 N = eksponentti, jonka arvo on välillä 2-4.

Jaksottaisen kuormituksen menetelmää voidaan soveltaa muidenkin kuin väsyttävän kuormi-tuksen alaisten rakenteiden käyttövarmuuden määrittämiseen. Esimerkkinä voidaan mainita erilaisten paineastioiden turvallisuustarkastukset, joissa koeponnistukset suoritetaan käyttö-paineita suuremmilla paineilla. Näissäkin mittauksissa on oleellista jännitysintensiiteetikijän tunteminen, mikä on mahdollista materiaalin laboratorioanalyysillä. (Ruuskanen, 1982)

Esimerkkinä voidaan mainita halkaisijaltaan 20-metrinen pallomaisen ammoniakksäiliön tar-kastus, jossa säiliö paineistettiin vedellä ja instrumentoitiin 61:lla anturilla siten, että emis-sioiden etenemismatka lähteestä anturiin oli korkeintaan kaksi metriä. Paineennosto pysäytet-tiin ja pidettiin vakiona neljässä paineessa välillä 0,34 Mpa – 0,52 Mpa säiliön käyttöpaineen ollessa 0,45 Mpa. Kun käyttöpaine ylitettiin, havaittiin kuvan 15 mukaisesti voimakas emis-sioaktiivisuuden kasvu ja lisäksi seuraavien paineenpitojaksojen aikana jatkuvaa emissioaktii-visuutta. Tulosten perusteella alueille, joissa emissioaktiivisuutta esiintyi, suoritettiin sisä-puolinen magneettijauhetestaus. Kaikilta alueilta löydettiin jännityskorroosiosäröjä. (Sarkimo, 1990)



Kuva 15. Akustisen emission kertyminen yhdelle anturilla ammoniakisäiliön testauksen aikana (Sarkimo, 1990).

Toinen sovelluskohde on akustisen emission käyttö hitsauksessa. Hitsauksessa mitataan myös emittoituvia pulsseja hitsatulla alueella ja sen lähiympäristössä ja analysoidaan ne. Akustista emissiota aiheuttavat murtumien ja huokosten lisäksi faasimuutokset, lämpöjännitysten aiheuttamat muodonmuutokset, kuonan muodostus ja murtuminen, pisaroiden muodostus, sulan metallin liike ja sähkökaaren aiheuttama melu. Koska kaikki nämä ovat riippuvaisia hitsausparametreista, voidaan hitsaustapahtumaa valvoa seuraamalla näiden aiheuttamia pulsseja. Ongelmana mittauksissa on häiriötekijöiden eliminointi. Erityisesti kuonanmuodostuksen ja sen murtumisen emissiopulssit on vaikeaa erottaa esimerkiksi hauraan faasin murtumasta. (Ruuskanen, 1982)

4.3 VUOTOJEN MONITOROINTI

Kahden toisestaan erotetun tilan välille voi syntyä vuotovirtaus, kun tilojen välillä vallitsee riittävä paine-ero ja on olemassa jokin reitti, jota pitkin vuotava aine pääsee virtaamaan vuotokohdan ylitse. Vuotava aine on tyypillisesti joko kaasua tai nestettä. Vuotokohtana voi olla tilojen välillä oleva rako, halkeama, suutin, kuristin, venttiili, tiivistevaurio, ruuvikierre tai jokin muu aukeama.

Vuotokohdassa olevan paine-eron vaikutuksesta vuotava aine pääsee kulkeutumaan tilasta toiseen. Vuotokohdan virtausdynamiikasta johtuen aineen paine laskee usein mekaanisesti kapeassa vuotokohdassa, jossa aineen virtausnopeus kasvaa. Vuotokohdassa vallitsevien olosuhteiden mukaan vuotavaan aineeseen imeytyneet kaasut voivat äkillinen paineenlaskun seurauksena ydintyä ja aiheuttaa voimakkaita pyörteitä vuotokohdassa, vaikka vuotavan nesteen virtaus yksinään olisikin laminaarista. Näin käy myös jos esimerkiksi vuototarkastuksen yhteydessä nesteeseen injektoidaan tarkoituksella kaasua. Syntyneen pyörteilyn vaikutuksesta kaasukuplat voivat törmätä vuotokohdan seinämiin, jolloin kuplan rikkoutumisen seurauksena syntyy satunnaisia impulsseja rakenteeseen, josta syntyy akustista emissiota (Miller ym., 1999).

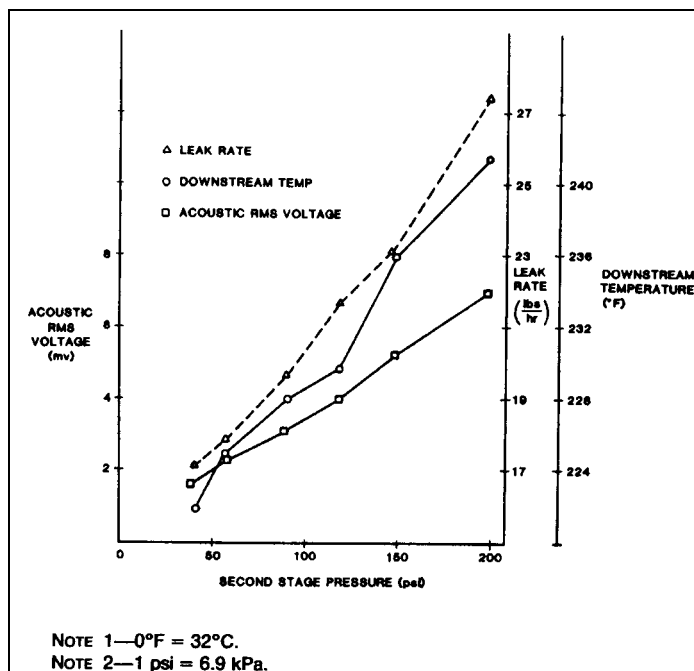
Mitattavassa kohteessa ulkoiset tai sisäiset häiriöt voivat vaikuttaa kohteessa käytettävän vuodon havainnointiin käytetyn järjestelmän luotettavuutta ja herkkyyttä. Vuodon havainnoinnin tehokkuuteen vaikuttavia häiriölähteitä on useita riippuen sovelluskohteesta. Häiriö voi tulla esimerkiksi mitattavan kohteen paikoista, jossa virtaus on turbulentti tai mitattavan kohteen lähellä tapahtuu kavitaatiota. Samoin kohteen lähellä oleva mekaaninen työstötapauhtuma, irtosien törmäys mekaanisiin rajapintoihin ja sähkömagneettiset häiriöt voivat vaikeuttaa vuodon monitorointia. Kohteen lähellä olevien häiriölähteiden vaikutus mittauspisteessä vaikuttaa siihen kuinka pieni vuodon aiheuttama muutos voidaan havainnoida mittauspisteessä. (Streicher, 1991; ASTM E 1211, 1997)

Vuodon mittauksissa tyypillisesti käytettävät anturit ovat pietsosähköisiä resonaattoriperiaatteella toimivia antureita, joiden taajuusalue voi ulottua yhteen MHz:iin asti. Antureiden mitaussignaali vahvistetaan ja suodatetaan ennen mitaussignaalien muuta prosessointia. Antureiden ja suodatuksessa käytettävä taajuusalue valitaan sopivaksi häiriölähteistä tulevien signaalien eliminoinniseksi. Vuodon havainnoissa tyypillisesti käytetty taajuusalue on 100 - 500 kHz (1 MHz). (Streicher, 1991; ASTM E 1211, 1997)

Vuotokohdan läheisyydestä mitatusta akustinen signaalista lasketaan suodatuksen jälkeen tunnuslukuja, joita voidaan käyttää vuodon tason määrittämiseen. Tyypillisesti mitaussignaaleista lasketaan signaalin tehollisarvo (RMS), joka korreloi vuodon mittauksissa käytetyllä taajuusalueella melko hyvin vuodon määrän kanssa. Signaalin tason vertailu hälytysrajoihin tulee kuulua myös signaalien prosessointijärjestelmään (Streicher, 1991; ASTM E 1211, 1997)

Vuodon monitoroinnin kannalta on tärkeää, että mitattavasta kohteesta mitataan aluksi terve tapaus, jossa vuotoja ei esiinny. Tätä perustilannetta voidaan käyttää referenssitasona, johon mittaustuloksia verrataan. Samalla kohteessa normaalisti vaikuttavan taustakohinan taso saadaan määrättyä mittauksessa käytettävällä taajuuskaistalla. Jos kohteessa tiedetään tapahtuvan muutoksia prosessiolosuhteissa (esimerkiksi paine tai lämpötila), jotka voivat korreloida vuotomäärän kanssa, on nämä syytä mitata. Mittaustuloksia voidaan käyttää hyväksi arvioitaessa vuodon ilmaantuessa syntyneen vuodon määrää.

Esimerkkinä voidaan mainita varoventtiilin vuodon monitorointi. Varoventtiilistä, jossa oli vuotava istukka, mitattiin vuodosta syntyneen akustisen signaalin korrelaatio vuotomäärän ja järjestelmässä vallitsevan paineen suhteen. Mittaukset suoritettiin laboratorio-olosuhteissa. Mittauksissa käytetty akustisen emission anturi kiinnitettiin ruuvipuristimella mitattavaan kohteeseen. Mitattava signaali suodatettiin kaistanpäästösuodattimella, jonka alarajataajuus oli 5 kHz ja ylärajataajuus 10 kHz. Lämpötila mitattiin vuotopisteen purkautumisreitien läheisyydestä termoelementillä. Kuvassa 16 on esitetty akustisen signaalin tehollisarvo (RMS) vuotomäärän, paineen ja lämpötilan suhteen.



Kuva 16. Esimerkki varoventtiilin vuodon havainnoinnista (ASTM E 1211, 1997).

Kuvasta 16 nähdään, että järjestelmän paineen noustessa 2.8 baarista 14 baariin, vuotomäärä kasvoi 59 %, lämpötila kasvoi 9 % ja akustisen emission anturilla mitattu tehollisarvo kasvoi 370 %. Näiden lukujen perusteella mittausjärjestelmän herkkyys vuodon havainnoinnin suhteen oli mittauskohteessa ja olosuhteissa erinomainen. (ASTM E 1211, 1997).

4.4 MUITA SOVELLUTUKSIA

Akustisen emission on osoitettu toimivan myös lineaarijohteiden kunnonvalvonnan menetelmänä (Mustonen ja Tervo, 2001). Tosin menetelmässä ei havaittu olevan mitään erityistä etua värähtelyjen ja äänentason mittauksiin verrattuna.

Jantunen (2001) on vertaillut porauksen monitorointiin käytettyjä menetelmiä, joista akustinen emissio oli yksi. Näyttäisi siltä että akustinen emissio ei ole erityisen sovelias kyseisen kaltaisen ilmiön monitorointiin. Ehkä yllättävään havaintoon vaikuttava syy on se, että anturi on sijoitettava melko kauas poranterästä. Tällöin signaalin tielle osuu useita rajapintoja, mikä heikentää signaalia. Porauksen aloitus- ja lopetushetket pystytään akustisella emissiolla kuitenkin havaitsemaan selkeästi.

5 YHTEENVETO

Akustisesta emissiolähteistä syntyvät aaltotyypit etenevät väliaineessa aaltotyypille ominaisella nopeudella. Väliaineessa voidaan havaita pitkittäissuuntainen ja poikittaissuuntainen aaltotyyppi. Aaltotyypit heijastuvat ja taittuvat kohdatessaan väliaineen rajapinnan ja muodostavat rakenteen sisällä etenevän aaltokimpun, joka muodostuu pitkittäis- ja poikittaissuuntaisista aalloista. Rajapinnalla pitkittäissuuntainen ja/tai poikittaissuuntainen aaltotyyppi muodostaa rajapinnalla kulkevan Rayleigh-aallon. Rayleigh-aallon värähtelyamplitudi on rakenteesta riippuen tyypillisten suurempi kuin pitkittäis- ja poikittaissuuntaisen aaltotyypin.

Akustista emissiossa signaalin taajuusinformaatio on jakautuneena useiden satojen kHz:n taajuuskaistalle. Korkeataajuisia ilmiöitä mitattaessa mittaavan anturin otsapinnan pinta-ala vaikuttaa suoritettaviin mittauksiin. Signaalin aallonpituus riippuu aaltotyypin nopeudesta ja taajuudesta. Jos aallonpituus on yhtä suuri kuin anturin otsapinnan halkaisija anturin havaitseman keskimääräinen liike on nolla. Akustisen emission signaalityyppiä mittaavissa soveluksissa, joissa mittaukset ulottuvat MHz-alueelle, otsapinnan halkaisijan täytyy olla pienempi kuin 3 mm.

Akustista emissiota mittaavat anturit kiinnitetään painamalla ne kytkentäaineen välityksellä mitattavaan rakenteeseen. Kytkentäaineen täyttää mittauspinnan epätasaisuudet, jolloin kytkentä kantaa koko pinnallaan ja välittää akustisen energian mahdollisimman hyvin anturille. Kytkentäaineena voi toimia jokin rasva tai anturin kiinnittävä liima. Rasvakytkentää käytettäessä anturin kiinnitys täytyy toteuttaa esim. ulkoisella ruuvipuristimella. Ulkoisia puristimia käytettäessä on huolehdittava siitä, että akustinen energia pääsee kulkeutumaan mahdollisimman esteettömästi anturille.

Prosessiteollisuudessa mitattavat kohteet ovat usein kuumia. Tällöin antureita ei voida viedä suoraan mitattavaan kohteeseen. Käyttämällä aaltojohtimia, signaalin energia voidaan siirtää

kuumista, vaikeista prosessiolosuhteista anturille, joka on suotuisemmassa paikassa. Aaltojohtimen käytössä on huomioitava, että johdintangon varsi ei kosketa mitään rakennetta, joka voisi vaimentaa mitattavaa signaalia.

Akustisen emission avulla voidaan joissakin tapauksissa tehostaa koneiden kunnon valvontaa. Tosin kaikissa tilanteissa menetelmällä ei saada etua esimerkiksi värähtelymittauksiin nähden. Tällainen on esimerkiksi laakerien kunnonvalvonta, vaikkakin käyntiin lähdön kaltaisissa tilanteissa jolloin pyörimisnopeudet ovat alhaisia menetelmästä todennäköisesti on etua. Akustinen emissio mahdollistaa nopeampien ilmiöiden havainnoinnin kuin värähtelymittauksilla – valitusta taajuusalueesta riippuen. Akustisen emission on todennettu toimivan kunnonvalvonnan menetelmänä useassa tapauksessa. Tässä raportissa mainittuja esimerkkejä ovat laakerien ja voitelun toimivuuden seuranta, särön seuranta, vuotojen monitorointi sekä lineaarijohteiden kunnonvalvonta.

6 KIRJALLISUUSVIITTEET

ASTM E 650. Standard guide for mounting piezoelectric acoustic emission sensors. American society for testing and materials, 1997.

ASTM E 1211. Standard practice for leak detection and location using surface-mounted acoustic emission sensors. American Society for Testing and Materials, 1997.

Brüel&Kjær, Instruction manual. Acoustic emission transducers and preamplifiers. 1984

Eagle, D., Brown, A., Considerations for the detection of acoustic emission waves in thin plates. *The Journal of Acoustic Emission*, Vol 57 (1975), ss. 591 – 597.

Egle, D., Wave propagation. In Miller, R. (editor). *Nondestructive testing handbook*. Second edition. USA: American Society for Nondestructive Testing (1987).

Eitzen, D., Acoustic emission sensors and their calibration. In Miller, R. (editor). *Nondestructive testing handbook*. Second edition. USA: American Society for Nondestructive Testing (1987).

Hardy, R., Taioli, F., Hager, M., Use of mechanical waveguides and acoustic antennae in geotechnical AE/MS studies. In *Journal of Acoustic emission*. World meeting on acoustic emission, 1989. Vol. 8, No 1-2, 1989: pp 42-48.

Higo, Y., Inaba, H., The general problems of AE sensors. In *Journal of Acoustic emission*. World meeting on acoustic emission, 1989. Vol. 8, No 1-2, 1989: pp 24-27.

Hopwood, T., Acoustic emission applications in civil engineering. In Miller, R. (editor). *Nondestructive testing handbook*. Second edition. USA: American Society for Nondestructive Testing (1987): pp 311-345.

Jantunen, E., The Applicability of Various Indirect Monitoring Methods to Tool Condition Monitoring in Drilling. *Proceedings of the 14th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, COMADEM 2001*. Elsevier Science Ltd., 2001.

Li, C., Li, S., Acoustic Emission Analysis for Bearing Condition Monitoring. *Wear*, Vol. 185 (1995), pp. 67 - 74.

Li, C., Ma, J., Wavelet Decomposition of Vibrations for Detection of Bearing-Localized Defects. *NDT & E International*, Vol. 30 (1997), pp. 143 – 149.

Mcbride, S. et. al., Acoustic emission application in the aerospace industry. Miller, R. (editor). *Nondestructive testing handbook*. Second edition. USA: American Society for Nondestructive Testing (1987): pp 417-445.

- Miettinen, J., Condition Monitoring of Grease Lubricated Bearings by Acoustic Emission Measurements. Tohtorin väitöskirja. Tampereen Teknillinen korkeakoulu, Tampereen Teknillisen Korkeakoulun julkaisu 307, Tampere, 2000.
- Miettinen, J., Leinonen, P., Monitoring of Contaminants in a Grease Lubricated Rolling Bearing by Acoustic Emission in Field Environment. Proceedings of the 2nd COST 516 Tribology Symposium, Antwerpen, Belgium, 20 and 21 May 1999, Flemish Institute for Technological Research, pp. 243 - 252.
- Mustonen, M., Tervo, J., Lineaarijohteen kunnonvalvonta akustisen emission, värähtelyn ja äänen mittauksin. VTT raportti, BVAL73-001059, 2001.
- Ruuskanen, P., Akustinen emissio. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere 1982. (Materiaaliopin laitos, tiedotteita 70/1982.) 23 s.
- Sarkimo, M., Jatkuvan monitoroinnin menetelmät rakenteiden eheyden varmistamiseen ydinvoimaloissa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1998. 41 s. (VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1883.)
- Sarkimo, M., Akustisen emission prosessiteollisuuden kunnonvalvontamenetelmät. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1990. 18 s. (VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1106.)
- Streicher, V., Acoustic monitoring systems – System concept and field experiment. Nuclear engineering and design, Vol. 129 (1991), ss. 151 – 162.
- Timoshenko, S., Goodier, J., Theory of Elasticity. Third Edition. Singapore, McGraw-Hill, 1970.
- Tomsic, J. (toim.), Dictionary of Materials and Testing. 2. Painos. SAE International, Warrendale, Philadelphia, USA, 2000.
- Viktorov, I., Rayleigh and Lamb Waves – Physical Theory and Applications. Plenum Press, New York, 1967.
- Votava, E., Jax, P. Inspection of nuclear reactors by means of acoustic emission during hydrostatic test. In Acoustic emission monitoring of pressurized systems. A symposium on non-destructive testing, 1979. ASTM 697: pp 149-164.
- Wadley, H., Microscopic origins of acoustic emission. In Miller, R. (editor). Nondestructive testing handbook. Second edition. USA: American Society for Nondestructive Testing (1987): pp 63-90.
- Yoshioka, T., Detection of Rolling Contact Sub-Surface Fatigue Cracks Using Acoustic Emission Technique. Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 49 (1992), pp. 303 - 308.
- Yoshioka, T., Korenaga, A., Mano, H., Yamamoto, T., Diagnosis of Rolling Bearing by Measuring Time Interval of AE Generation. Transactions of the ASME, Vol. 121 (1999), pp. 468 - 472.