


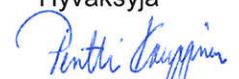


Guided wave tekniikan käytön soveltuvuus kauko- lämmön siirtolinjojen korjaustarpeen ajoitukseen

Kirjoittajat: Stefan Sandlin ja Ari Koskinen

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Guided wave tekniikan käytön soveltuvuus kaukolämmön siirtolinjojen korjaustarpeen ajoitukseen	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Energiateollisuus ry, Veli-Pekka Sirola, PL 100 (Fredrikinkatu 51-53 B), 00101 Helsinki	Asiakkaan viite
Projektin nimi Guided wave tekniikan soveltuvuus siirtolinjojen korjaustarpeen ajoitukseen	Projektin numero/lyhytnimi 71275/Guided Wave
Raportin laatijat Stefan Sandlin ja Ari Koskinen	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 25 s. + 2 liitettä
Avainsanat Guided wave, kaukolämpö, korrosio, luokittelu, korjauksen ajoitus, long range ultrasonic testing, LRUT	Raportin numero VTT-R-07133-10
Tiivistelmä <p>Tässä työssä on tutkittu Guided wave (GW) tekniikan soveltuvuutta kaukolämpöputkien korjaustarpeen ajoitukseen. Tekniikka perustuu matalataajuiseen (yleensä kymmeniä kHz, mutta alle 100 kHz) ultraääneen ja on alun perin kehitetty öljy- ja kaasuteollisuuden putkistojen tarkastukseen. Menetelmä perustuu anturirenkaaseen, joka lähettää ääniaaltoja muutaman kymmenen metrin päähän molempiin suuntiin pannasta. Esimerkiksi putkessa oleva korrosioalue paljastuu äänen heijastuksena, joka otetaan vastaan samalla pannalla. Kaukolämpöputket ovat vaativia kohteita, koska ne ovat usein kierrehitsattuja, niissä on paljon mutkia, venttiilejä ja liitoksia, jotka häiritsevät ääniaaltojen etenemistä. Eristeistä (vuorivilla) ja ohuesta maali-kerroksesta ei sen sijaan ole paljon haittaa. Vesitäytteisillä putkilla lähetysmoodina käytetään yleensä torsioaaltoa, ja vastaanottopuolelle rekisteröidään sekä torsio- että värähtelymoodeja. Lähtökohtana on ollut tarjolla olevien laitteistojen ja tarkastuspalvelujen tarkastelu sekä tutustuminen Euroopassa jo tehtyihin GW mittauksiin kaukolämpöputkistoilla. Tällaisia mittauksia ei vielä ole kovin paljon, eikä niiden analyysiä ole viety kovin syvälle. Näyttää kuitenkin siltä, että GW tekniikasta voi olla hyötyä kaukolämpöputkiston korjaustarpeen ajoitukseen, kunhan tekniikkaa opitaan soveltamaan oikein. On todennäköistä, että menetelmällä pystytään löytämään ne kohdat, jossa lähivuosina testauksen jälkeen voi syntyä katastrofaalisia vuotoja. Tekniikka on myös kehittynyt sen jälkeen, kun aiemmin testattiin GW tekniikkaa kaukolämpöputkiin Suomessa ja Ruotsissa. Tähän asti laitteiston käyttäjän osaamistaso on vaikuttanut voimakkaasti testauksen tulokseen. Koulutuksen yhtenäistymisen myötä tällaiset vaihtelut vähenevät. Näitä taustoja vasten näyttäisi olevan perusteltua paneutua kaukolämpöputkistojen GW testaukseen syvällisemmin yhdessä sopivan GW palveluntarjoajan kanssa.</p>	
Luottamuksellisuus	Julkinen
Espoo, 13.9.2010 Laatijat	
 Stefan Sandlin Tutkija	 Ari Koskinen Tutkija
 Tarja Jäppinen Tutkija	 Pentti Kauppinen Teknologiapäällikkö
VTT:n yhteystiedot VTT, PL 1000 (Kemistintie 3, Espoo), 02044 VTT, puh. 020 722 111 (vaihde), sähköposti: etunimi.sukunimi@vtt.fi	
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Energiateollisuus ry, Veli-Pekka Sirola sekä kaukolämpöyrietykset VTT Kirjaamo	
<p style="text-align: center;"><i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i></p>	

Summary

The strength of the GW technique is that it can rapidly screen long parts of a in-service pipeline to find potential corroded areas without removing the insulation. In the literature it is often said that the technique can do a 100% testing. However, it should be kept in mind that corrosion near welds, welded supports, bends, T-joints etc may not be easily identified. The detection limit is often said to be 3% of the CSA (Cross Sectional Area). A corrosion patch equal to or larger than 9% CSA is said to be observed “for sure”. These are quit large defects but the GW technique is intended for finding corrosion patches rather than small point formed leaks. In the following example we investigate what a “quite large defect” means for a pipe with an outer diameter of 150 mm and a wall thickness of 6 mm. All the following defects are about 4% of the CSA:

- A 0.25 mm deep defect extending around the entire circumference
- A 1.5 mm deep defect extending 75 mm in the circumferential direction
- A 3.0 mm deep defect extending 40 mm in the circumferential direction

Some experts believe that the detection limit can be pressed down to 1% of the CSA at least in ideal conditions. There are still only three instrument providers worldwide: Guided Ultrasonics Ltd (Wavemaker) and Plant Integrity Ltd (Teletest) in UK as well as Southwest Research Institute (MsS technique) in USA. Plant Integrity Ltd is a wholly owned subsidiary of The Welding Institute (TWI). The MsS technique in its present form cannot recognize flexural modes so it is not well suited for the relatively demanding testing of district heating tubes. The situation may be different if a continuous monitoring using a permanently installed sensor collar is needed. This is because the MsS collar is very cheap compared to the piezo collars. Several service providers using GW technique were found and some of them are listed in Appendix 2. According to our investigation in-service district heating tubes have so far been tested using GW technique in Finland, Sweden, Denmark and the Czech Republic. The tests in Finland and Sweden were done by Plant Integrity Ltd using the Teletest equipment. In Denmark Force Technology conducted the tests while Applus RTD tested the tubes in the Czech Republic. Both Force and Applus used the equipment manufactured by Guided Ultrasonics Ltd. The range of the GW technique is usually said to be about 30 m in both directions from the collar (and up to 100 m in ideal conditions). In the Swedish test the range was 10 – 15 meters while it was 20 – 30 meters in the Finnish tests. In the worst cases in both Sweden and Finland the range was only a few meters. No report is available about the measurements done in Denmark and the Czech Republic, but the range was said to be over 20 meters. At least the tubes tested in Finland, Sweden and Denmark were spiral welded. Based on the available reports it seems that the GW technique would be useful in scheduling the repair work of district heating pipelines. For example, the GW signal received from a pipe in bad condition is clearly different from the signal from pipe in good condition. There is, however, not very much testing data available and the analysis have not been very thoughtful at least according to the public reports. To gain exact information about usefulness of the GW technique for testing of district heating tubes a more extensive field testing program is needed together with a thoughtful analysis which also should include classifying attempts. The authors of this report therefore recommend the launching of a new research project to get statistical evidence of the usability of the GW technique for classification of district heating pipes.

Alkusanat

Tekijät kiittävät Veli-Pekka Sirolaa Energiateollisuus ry:stä sekä kaukolämpöyrietysten edustajia tämän tutkimuksen tukemisesta, neuvoista sekä taustamateriaalin toimittamisesta. Lisäksi olemme kiitollisuudenvelassa Sauli Heikkiselle, joka on esitellyt meille Inspectan uuden Guided wave laitteiston sekä lukuisille ulkomaalaisille asiantuntijoille, jotka ovat ystävällisesti vastanneet tiedusteluihimme. Kansikuva on artikkelista ”Pipeline long-range inspection and monitoring by an innovative magnetic collar for magnetostrictive guided-wave systems” (Bertoncini, Raugi & Turcu, 2008).

Espoo, syyskuu 2010

Stefan Sandlin ja Ari Koskinen

Sisällysluettelo

Summary	2
Alkusanat.....	3
1 Johdanto.....	5
2 Tavoite.....	6
3 Yleistä Guided Wave tekniikasta	6
4 GW laitteistot	9
4.1 Guided Ultrasonis Ltd:n laitteisto	9
4.2 MsS laitteisto.....	11
4.3 Teletest Focus laitteisto	12
4.4 GW testauspalvelut.....	13
4.5 Vian havaitsemistodennäköisyys POD	13
5 Pohjoismaissa suoritettut kokeilut GW tekniikalla.....	14
5.1 Ruotsissa vuonna 2004 suoritettut laboratorikokeet	15
5.2 Helsingissä vuonna 2005 suoritettut kenttäkokeet.....	15
5.2.1 Yliopistokadun mittaukset	16
5.2.2 Lepolantien mittaukset	17
5.3 Muita kenttäkokeita	19
5.4 Kokeista saatu yleisvaikutelma	21
6 Johtopäätökset ja suositukset.....	22
6.1 Jatkotutkimus	22
7 Yhteenveto	23
Lähdeviitteet	24
Liitteet 1 ja 2	

1 Johdanto

Maan alla kulkeviin kaukolämpöjohtoihin saattaa ajan myötä kehittyä yhä suurempia korroosioaurioita putken ulko- tai sisäpintaan, jolloin vakavien vuotojen riski kasvaa. Putket ovat siis pääosin luoksepääsemättömiä, paitsi esimerkiksi huoltokaivojen kohdalla. Kaukolämpöputkiston kunnon selvittäminen normaaleilla NDT (Non-Destructive Testing) menetelmillä on näin ollen lähes mahdotonta. Myös ns. porsaiden käyttö on hankalaa. Porsas on robotti, joka liikkuu putken sisällä ja suorittaa ultraääni- ja/tai magneettivuomittauksia korroosioaurioiden paikantamiseksi (Pasonen & Hakkarainen, 2006). Kaukolämpöputkistoissa ei ole sopivia sisäänmeno- ja ulostuloaukkoja porsaalle ja koska tarkastus halutaan tehdä putkiston ollessa käytössä (täynnä virtaavaa kuumaa vettä) voidaan sanoa, että putki on ”unpiggable”. Guided Wave (GW) tekniikka jää näin ollen ainoaksi vaihtoehdoksi.

GW tekniikka on kehitetty öljy- ja kaasuteollisuuden putkistojen testaukseen, mutta sitä on käytetty myös kaukolämpöputkien testaukseen Suomessa, Ruotsissa, Tanskassa ja Tsekissä. Suomessa Plant Integrity Ltd teki demon Helsingin Energialle vuonna 2005. GW toimii siten, että esimerkiksi huoltokaivon kohdalla poistetaan eristeet putkesta alle metrin pituudelta ja kiinnitetään anturipanta putkeen. Panta lähettää matalataajuista ultraääntä putkeen ja putki toimii aaltojohtimena. Äänipulssi etenee pannasta molempiin suuntiin (ei kuitenkaan yhtä aikaa) kymmeniä metrejä eristeen alla. Mikäli ääniaalto törmää tarpeeksi isoon korroosioaurioon, hitsiin, T-liitokseen tai mihin tahansa kohtaan, missä putken muoto poikkeaa puhtaasta sylinterimuodosta syntyy heijastus, joka voidaan rekisteröidä samalla pannalla. Heijastajan paikka putken pituussuunnassa voidaan laskea äänipulssin kulkuajasta. Heijastajan kohdalla syntyy uusia aaltomuotoja, esimerkiksi erilaisia värähtelymoodeja, ja näiden avulla voidaan arvioida vaurion sijaintia ja laajuutta putken kehäsuunnassa, sekä erottaa korroosioauriosta tuleva signaali esimerkiksi virheettömän hitsin aiheuttamasta signaalista. Moodimuutoksesta voi myös olla haittaa, sillä esimerkiksi hitsatun tuen kohdalla syntynyt moodi etenee alkuperäisen moodin kanssa ja molemmat heijastuvat vaikeuttaen siten heijastajan tunnistamista. Nämä ei-toivotut moodit aiheuttavat ns. koherenttia kohinaa, joka ei poistu keskiarvoistamalla monta signaalia.

GW tekniikalla ei voida todeta, onko korroosioaurio putken sisä- vai ulkopinnalla. Kantama on vahvasti riippuvainen putken pinnan laadusta. Korroosio, hitsit, hitsatut tuet, mutkat, paksu pinnoite, T-liitokset jne. voivat vaimentaa ääntä niin voimakkaasti, että kantama jää vaan muutamaan metriin ja näissä tapauksissa GW tekniikasta ei ole paljon hyötyä. Mikäli tarkastettavassa putkiosuudessa ei ole jyrkkiä mutkia, T-liitoksia tai muita vahvasti äänen kulkua häiritseviä geometrisiä yksityiskohtia vaikuttaa siltä, että kaukolämpöputkissakin voitaisiin päästä noin 30 metrin kantamaan kumpaankin suuntaan anturipannasta. Näissä tapauksissa tekniikasta on jo selvästi hyötyä. Tässä kannattaa muistaa, että korroosioauriosta saatavan kaiun voimakkuus riippuu pääosin siitä, kuinka suuren prosentiosuuden vaurio vie putken seinämän pituussuuntaisesta poikkipinnasta. Näin ollen pieni pistesyöpymä voi jäädä huomaamatta, vaikka se menisi seinämän läpi. GW tekniikka ei siis sovi pienten vuotokohtien etsimiseen. GW tekniikka on lähinnä luokittelutyökalu, jolla nopeasti voidaan löytää potentiaaliset huonot putkiston osat ja suunnata korjaustyö sinne, missä vuotoriski on suurin.

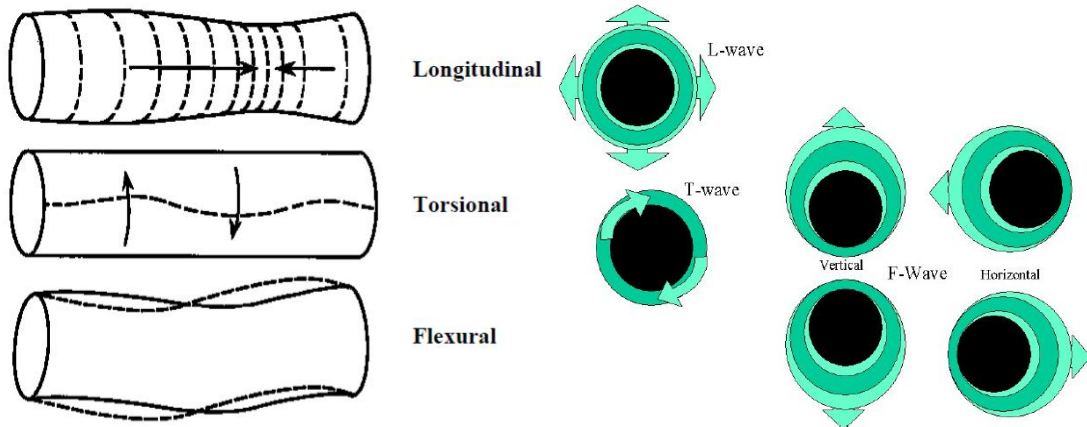
2 Tavoite

Plant Integrity Ltd teki vuonna 2004 laboratoriodemon Ruotsissa ja vuonna 2005 kenttädemon Helsingissä Guided Wave (GW) tekniikan käyttökelpoisuudesta kaukolämpöputkien korroosioaurion toteamiseen. Nämä demot jättivät kuitenkin paljon avoimia kysymyksiä. Tässä työssä tutkitaan mainituista demoista saatuja tuloksia ja tarkastellaan mitä olisi kannattanut tehdä toisin, tavoitteena aikaansaada suositus siitä, miten mahdollinen jatkotutkimus kannattaa toteuttaa ja mitä mittausten raportoinnilta kannattaa vaatia. Tavoitteena on myös kerätä tausta-aineistoa mahdollisia jatkotutkimuksia varten. Työssä esitellään lyhyesti GW tekniikan yleisiä periaatteita sekä kartoitetaan maailmalla tällä hetkellä olemassa olevia GW-laitteistoja, niiden teknillisiä eroja sekä niiden hintatasoa. Lisäksi listataan GW-testauspalvelujen tarjoajia ja pyritään selvittämään, millä yrityksillä on parhaat edellytykset kaukolämpöputkiston GW testaukseen, mikäli tätä tekniikkaa päätetään kokeilla laajemmin. GW tekniikkaa tarkastellaan luokittelutyökaluna eli menetelmänä, jolla nopeasti pystytään määrittelemään putken yleiskunto käytön aikana. Tätä taustaa vasten tekniikka on hyödyllinen, mikäli tutkitut kaukolämmön siirtolinjat voidaan luokitella korjaustarpeen kiireellisyyden mukaan ainakin tilastollisessa mielessä.

3 Yleistä Guided Wave tekniikasta

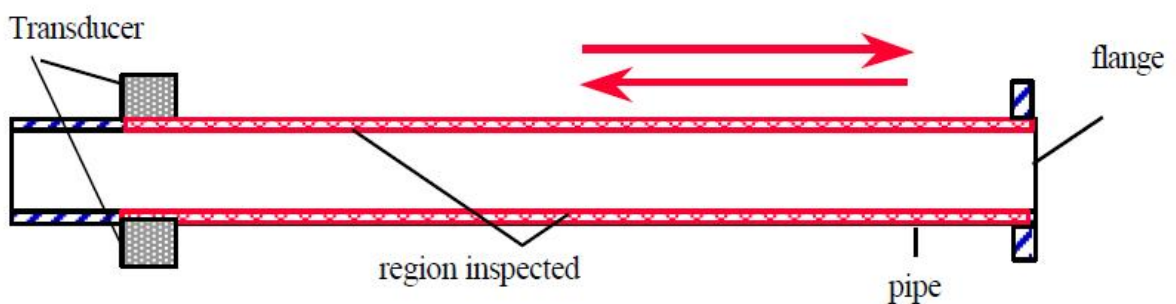
Guided Wave (GW) tai Long Range Ultrasonic Testing (LRUT) on verrattain uusi ultraäänitekniikka, jota on kehitetty vuodesta 1987 lähtien. Tekniikka eroaa perinteisestä ultraäänitekniikasta siinä, että yhdestä tarkastuskohdasta voidaan nopeasti tarkastaa kymmeniä metrejä putkea poistamalla eristeitä ainoastaan putken ympärille laitettavan anturipannan kohdalta. Vian sijainnin ja vikakoon määrittämisessä tekniikka ei pääse lähellekään sitä, mihin perinteinen ultraäänitekniikka pystyy; pitkä kantama antaa kuitenkin uusia mahdollisuuksia putkilinjojen kunnan luokitteluun ja kunnostustöiden aikatauluttamiseen, jotta vältetään yllättäviä putkivaurioita. GW-menetelmä on tietävästi ainoa tekniikka, jolla potentiaalisesti voidaan testata käytössä olevia putkia.

Ääni voi edetä putkessa useissa moodeissa ja monet moodit ovat dispersiivisiä, eli aallon nopeus riippuu taajuudesta (sekä putken halkaisijasta että seinämän paksuudesta). Kuvassa 1 nähdään kolme yleisesti käytettyä moodia GW tekniikassa. Heijastuksissa muodostuu usein uusia moodeja (Edwards, 2006). Kuvassa 2 nähdään GW testauksen peruseriaate. Putken ympärille laitettu anturipanta (transducer) lähettää matalataajuisen ultraäänipulssin kulkemaan oikealle pitkin putkea, jos putkessa on tarpeeksi laaja korroosioaurio (ei näy kuvassa) syntyy heijastus, joka voidaan todeta samalla anturipannalla. Korroosioaurion sijainti voidaan määrittää äänipulssin kulkuajan perusteella. Tarkastelemalla vauriokohdan synnyttämiä värähtelymoodeja voidaan myös arvioida korroosioaurion laajuutta kehäsuunnassa. Ääniaalto ei etene oikealla olevan laipan yli vaan heijastuu laipasta. Vastaavasti voidaan laitteiston asetuksia muuttamalla lähettää ääniaalto vasemmalle anturipannasta eli putkea voidaan tarkastaa molempiin suuntiin anturipannasta. Anturipannan välittömään läheisyyteen jää kuitenkin ns. ”dead zone”, lähialue, joka ulottuu noin metriin molempiin suuntiin anturipannasta. Tältä alueelta ei yleensä saada luotettavia tuloksia.



Kuva 1. Esimerkkejä putkessa etenevistä ultraäänimooideista: Pitkittäinen- (longitudinal), torsio- (torsional) ja värähtelyaalto (flexural). Värähtelyaallon vaaka- ja pystypolarisaatio on esitetty oikealla (Edwards, 2006).

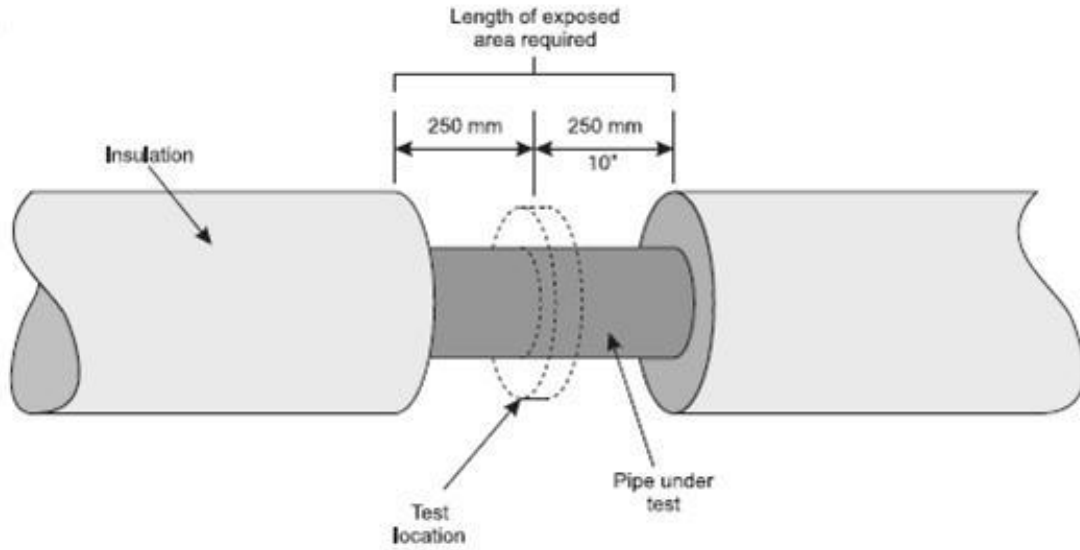
Heijastajan amplitudi korjattuna (Distance Amplitude Corrected, DAC) ei ole suora mitta jäljellä olevalle seinämänpaksuudelle, vaan amplitudi riippuu sekä heijastajan syvyydestä että kehäsuuntaisesta pituudesta. Amplitudi riippuu siis lähinnä siitä, kuinka suuren osan putken seinämän poikkisuuntaisesta pinta-alasta (CSA Cross-Sectional Area) korrosio on syönyt. Tästä syystä menetelmä on suunnilleen yhtä herkkä ulko- ja sisäpuolisille vioille. Yleensä sanotaan, että havaitsemisraja on noin 3 % CSA:sta. Testauksen raportointirajaksi valitaan yleensä 9 %, jotta vältetään virheellisiltä positiivisilta näyttämiltä (Pereira et al., 2002). Virhe, jonka koko on 9 % CSA:sta havaitaan 95 % luotettavuustasolla (Glas & Sund, 2006). Peukalosääntönä voidaan sanoa, että tämä pätee etäisyyteen 30 metriä anturipannasta (Turcu, 2009). Kehittyvät fokusointimenetelmät voivat parantaa GW tekniikan suorituskykyä (Rose et al., 2009). Force Technology:n Bertelsenin (2010) mukaan hyvän signaalin aikaansaaminen nykytekniikalla edellyttää yleensä, että 10–15 % CSA:sta on menetetty.



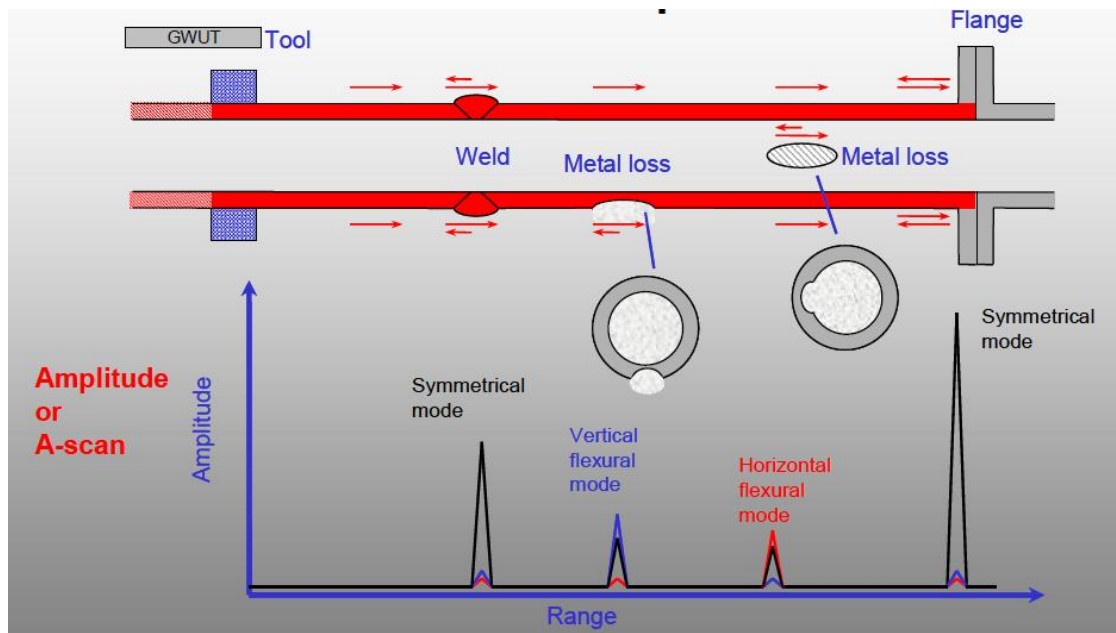
Kuva 2. GW tarkastuksen periaate. Anturipanta (transducer) lähettää ultraäänipulssin oikealle pitkin putken seinämää. Pulssi heijastuu mahdollisista korroosioaurioista sekä oikealla olevasta laipasta (flange). Testausta voidaan vastaavalla tavalla toistaa myös vasempaan suuntaan (Pereira et al, 2002).

Kuva 3 näyttää miten GW testaus tapahtuu. Eristeitä ei tarvitse poistaa enempää kuin anturipannan kiinnittäminen putken ympäri vaatii (tässä tapauksessa puolen metrin alueelta). Irtonaista maalia ja ruostetta täytyy poistaa esimerkiksi teräsharjalla (Guided Ultrasonics Ltd). Mikäli putken sisällä (ja/tai ulkopuolella) on vettä, käytetään ns. torsioaaltoa, koska tämä aaltomuoto vaimenee vähemmän kuin esimerkiksi pitkittäisaalto. Korroosioauriosta heijastuu usein erilaisia värähtelymooideja (flexural mode), kuten esimerkiksi aaltoja, jotka värähtelevät

vaaka- tai pystytasossa. Näistä moodeista on hyötyä pääteltäessä onko saatu signaali peräisin korroosioauriosta tai hitsistä kuten kuvassa 4 esitetään. Värähtelymoodit antavat myös karkeaa tietoa korroosioaurion sijainnista kehäsuunnassa. Hitseistä ja laipoista heijastuu lähinnä symmetrisiä moodeja (Weber, 2005).



Kuva 3. GW testauksen suoritus. Yleensä sama anturipanta toimii sekä lähettäjänä että vastaanottajana (Guided Ultrasonics Ltd). Eristeitä tarvitsee purkaa vain anturipannan alta. Lohkoilevaa maalia ja ruostetta täytyy poistaa pannan alta.



Kuva 4. Eri aaltomoodeista on apua korroosioaurion tunnistamisessa ja paikantamisessa. Esimerkiksi hitsi heijastaa enimmäkseen symmetrisiä moodeja, kun taas vioista tulevat kaiut ovat usein epäsymmetrisiä, tässä punaisella ja sinisellä (Weber, 2005).

4 GW laitteistot

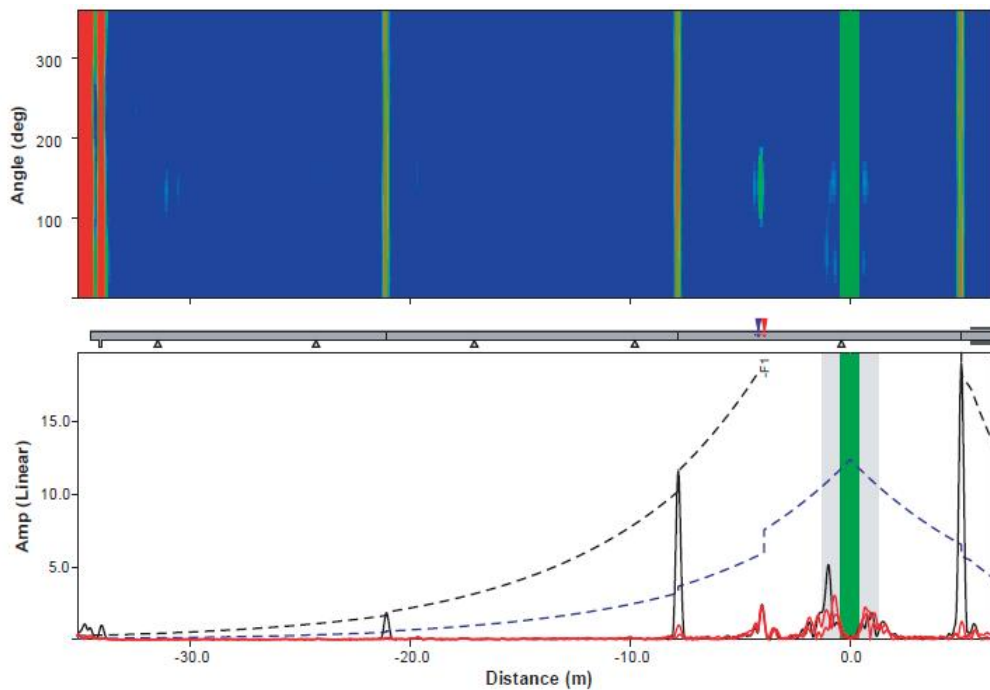
Maailmalta löytyy kolme laitetoimittajaa, Guided Ultrasonics Ltd ja The Welding Institute Ltd (TWI) Englannista sekä Southwest Research Institute (SwRI) Yhdysvalloista. Ensin mainitut juontavat juurensa Englantilaisesta Imperial Collegesta ja perustuvat anturipantaan, jossa on monta pietsosähköistä ultraäänianturia. SwRI:n laitteisto eroaa radikaalisti ensin mainituista, koska anturipannan toiminta perustuu magnetostriktiiviseen ilmiöön. Tästä GW tekniikasta käytetään lyhennettä MsS (Magnetostrictive Sensor). MsS anturipanta on hyvin yksinkertainen, ohut, kevyt ja halpa eikä panta tarvitse räätälöidä eri putkihalkaisijoille. Toiminnallisia eroja pietsosähköisiin anturipantoihin verrattuna kuitenkin on. MsS panta synnyttää tehokkaasti puhtaita torsiomoodoja putkeen, mutta värähtelymoodien vastaanotto ei suoraan onnistu, koska panta ei ole segmentoitu kehäsuunnassa. Segmentoituja MsS pantoja voidaan rakentaa, mutta silloin tämä tekniikka monimutkaistuu huomattavasti, pannaan koko kasvaa ja luonnollisesti hintakin. Tästä kerrotaan enemmän seuraavassa lyhyessä laitteisto-esittelyssä. Sekä Guided Ultrasonics Ltd:n että TWI:n Teletest laitteistoja on käytetty pohjoismaissa kaukolämpöputkistojen testaukseen. Tässä työssä ei löytynyt tietoa siitä, että MsS tekniikkaa olisi kokeiltu kaukolämpöputkilla. MsS tekniikka on kuitenkin käytetty kierrehitsattujen putkien testaukseen (Kwun, 2010). Anturipannan asentamista varten tarvitaan yleensä vajaa 1 metri vapaata tilaa putken pituussuunnassa, josta eristeet on poistettu. Säteissuunnassa pietsopanta vaatii vähintään 75 mm vapaata tilaa putken ympäri. MsS panta pystytään asentamaan, vaikka kahden putken välinen etäisyys on vain 25 mm. Nämä arvot ovat tietysti ahtaimman paikan minimivaatimuksia, muuten asentajalle pitää varata riittävästi työskentelytilaa. Yleensä pietsosähköisiin anturipantoihin perustuvat laitteet näyttävät olevan kehityksessä edellä. Vaikka MsS järjestelmän kokonaishinta onkin edullisin, hinta vaikuttaa kuitenkin korkealta kun otetaan huomioon, että nykyversion tekniikka on suhteellisen yksinkertainen.

4.1 Guided Ultrasonics Ltd:n laitteisto

Kuvassa 5 nähdään Guided Ultrasonics Ltd:n uusin laite G3 sekä kaksi eri anturipantaa. Toinen panta kiristetään kiinni putken ympäri ruuveilla ja toinen ilmatäytteisellä renkaalla. Tällä laitteistolla voidaan nykyään A-kuvien lisäksi tuottaa C-kuvia ("unrolled pipe display") putkesta löytyneistä vioista. A-kuva on kaikuamplitudi etäisyyden funktiona. A-kuvassa esitetään kolmen eri aaltomuodon amplitudit eli torsiomoodi, vaakatasossa värähtelevä moodi sekä pystytasossa värähtelevä moodi (vrt. kuva 4). C-kuvassa taas amplitudi esitetään värikoodattuna sekä etäisyyden että putken kehäkoordinaatin avulla. C-kuva antaa havainnollisen kuvan testituloksista. Kuvassa 6 nähdään esimerkki sekä A- että C-kuvista. Kuvassa panta sijaitsee kohdassa 0 (leveä vihreä pystyviiva) ja C-kuvasta nähdään, että noin 5 m vasempaan pannaan on vika, joka sijaitsee noin 170 asteen suunnassa putken kehällä. Päittäishitsit näkyvät pystyviivoina kohdissa (noin) 5 m, -9 m ja -21 m. EFC-moduli (Enhanced Focusing Capability) parantaa vian paikantamistarkkuutta kehäsuunnassa.



Kuva 5. Guided Ultrasonics Ltd:n laite G3 sekä kaksi anturipantaa (Silverwing).



Kuva 6. Alhaalla nähdään mittauksesta saadut A-kuvat ja ylhäällä C-kuva (Guided ultrasonics Ltd).

Guided Ultrasonics Ltd:n laitteiston hintatietoja

Guided Ultrasonics Ltd:n Wavemaker G3 laitteisto putkihalkaisijoille 100–610 mm maksaa 190 k€ ja hintaan sisältyy 10 anturipantaa sekä 50 anturia (jotka kiinnitetään käytettäviin pantoihin), ohjelmisto, tietokone, tarvikkeita sekä EFC-moduli (Enhanced Focusing Capability). Laitteiston hinta ilman antureita ja pantoja on 73 k€. Kokonaispakettiin sisältyy 5 päivän koulutusjakso (7200 €) asiakkaan luona sekä 5 päivän konsultointipalvelu (4500 €).

4.2 MsS laitteisto

MsS laitteisto on esitetty kuvassa 7. Anturipanta koostuu kahdesta noin 0,15 mm paksusta magnetostriktiivisestä nauhasta (esimerkiksi Ni tai FeCo), jotka kiinnitetään liimaamalla tarkastettavan putken ympäri (Turcu, 2009). Molempien nauhojen päälle laitetaan sähkökela. Kuvassa 7 sähkökelat on tehty parista lattakaapelista, paksuus < 4 mm. Tässä tekniikassa tarvitaan kaksi nauhaa ja kaksi kela, jotta testaussuunta (oikealle tai vasemmalle kuvassa 7) voidaan valita. Anturipanta on hyvin yksinkertainen ja soveltuu luontevasti erilaisille putkihalkaisijoille ja sillä voidaan synnyttää puhtaita torsioaalto-omodeja. Nauhojen liimaaminen putkeen vie kuitenkin enemmän aikaa kuin pietsosähköisen pannan kiinnittäminen. Toinen haittapuoli on se, että MsS panta ei sellaisenaan ole herkkä värähtelyomodeille (Lowe & Cawley, 2006), koska se ei ole segmentoitu kehäsuunnassa, kuten pietsosähköiset pannat. Toisaalta MsS panta voisi halpuutensa takia olla hyödyllinen putken kunnan monitorointiin pysyvästi asennettuna. Segmentointiin on kehitteillä ratkaisuja esimerkiksi Pisan yliopistossa (Turcu, 2009). Silloin anturipanta kuitenkin monimutkaistuu ja kallistuu sekä osa MsS tekniikan eduista menetetään. Värähtelymoodien tunnistaminen on tärkeää, kun halutaan arvioida vaurion sijaintia ja laajuutta putken kehäsuunnassa sekä tuottaa C-kuvia. Tämän raportin kansikuvana on C-kuva, joka on tuotettu Pisan yliopiston modifioidulla MsS tekniikalla (Bertoncini, Raugi & Turcu, 2008). Tätä modifioitua MsS laitteistoa voidaan pitää prototyypinä. Laitteiston alkuperäinen kehittäjä, SwRI USA:ssa, kehittää myös ohutta, kehäsuunnassa segmentoitua MsS pantaa, jolla pystytään soveltamaan SAFT-tekniikkaa (Synthetic Aperture Focusing Technique) ja arvioimaan vaurion sijaintia ja laajuutta putken kehäsuunnassa (Kwun, 2010). Tämä kehitystyö on kuitenkin vielä kesken. Patenttihakemuksesta ”Flexible plate magnetostrictive sensor probe for guided-wave inspection of structures” (Kwun et al., 2010) löytyy tietoja segmentoidun anturin rakenteesta.

MsS laitteiston hintatietoja

MsS laitteiston hinta on noin 100 k€. Tähän sisältyy itse mittauslaite, ohjelmisto ja ohjelmiston käyttölisenssi. Lisäksi hintaan sisältyy tarvikkeita, joilla voidaan rakentaa anturipantoja korkeintaan 600 millimetrin putkihalkaisijoille sekä viikon käyttäjäkoulutus SwRI:llä USA:ssa.



Kuva 7. MsS laitteisto, tietokone ja mittauslaite vasemmalla. Oikealla mittauspanta, joka koostuu kahdesta putkeen kiinnytetyistä magnetostriktiivisestä nauhasta sekä parista lattakaapelista niiden päällä (GWA brochure).

4.3 Teletest Focus laitteisto

Tämä on Englantilaisen The Welding Institute:n (TWI) laitteisto ja se nähdään kuvassa 8. Tämä laitteisto on teknisiltä ominaisuuksiltaan melko samanlainen kuin Guided Ultrasonics Ltd:n laitteisto. Teletestilläkin on tekniikka, jolla vian paikantamistarkkuutta kehäsuunnassa parannetaan fokusoinnin avulla.



Kuva 8. Teletest laitteisto, mittauslaite, tietokone ja anturipanta (Edwards & Gan, 2007).

Teletest laitteiston hintatietoja

Laitteiston hinta on 142 k€ ja tähän sisältyy anturipantoja 100 – 500 millimetrin putkihalkaisijoille sekä ohjelmisto. Pelkkä mittauslaite, ilman pantoja maksaa noin 29 k€ Anturipannat muodostavat siis suurimman kustannuserän. Viikon käyttäjä koulutus Lontoossa maksaa 2100 €/per henkilö.

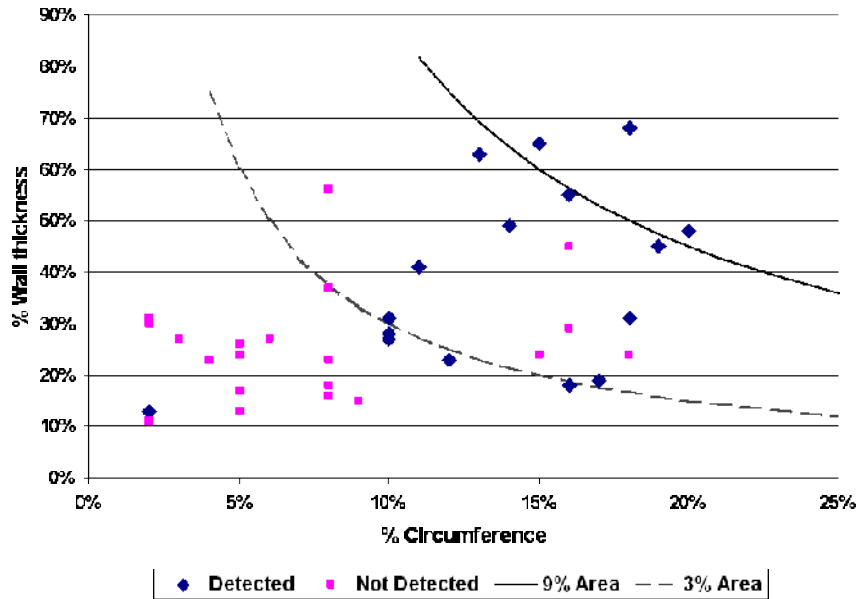
4.4 GW testauspalvelut

Euroopasta löytyy useita GW palveluja tarjoavia yrityksiä ja valtaosa perustuvat pietsosähköisten pantojen käyttöön. Euroopassa Applus RTD, NDT Consultants Ltd sekä Pisan yliopiston tutkimusryhmä (Turcu, 2010) suorittavat MsS-testauksia asiakkaan luona. Yhdysvaltalainen SwRI suorittaa kyllä testauksia Euroopassakin. Liitteessä 2 on lista GW testauspalveluja tarjoavista yrityksistä ja laitoksista. Suomessakin on nykyään GW laitteisto. Inspecta on äskettäin hankkinut Guided Ultrasonics Ltd:n Wavemaker G3 laitteiston.

4.5 Vian havaitsemistodennäköisyys POD

Vian havaitsemistodennäköisyys, POD (Probability of Detection) riippuu siitä, kuinka suuren prosenttiosuuden putken seinämän poikkisuuntaisesta pinta-alasta (CSA Cross-Sectional Area) korroosio on syönyt. Jos putken kehäsuunnassa on monta pientä vikaa vierekkäin, voidaan niiden pinta-alat laskea yhteen, vaikutus on siis additiivinen. Kuvassa 9 on esitetty sokkotestin tuloksia putkella, jonka halkaisija oli 200 mm. Putkessa oli 36 erilaista vikaa (Rose et al, 2002). Kuvassa pysty akseli ilmoittaa kuinka suuren osuuden vika vie putken seinämän paksuudesta ja vaak akseli ilmoittaa kuinka suuren osuuden vika vie putken kehästä. Siniset neliöt edustavat havaittuja virheitä ja punaiset ei havaittuja. Katkoviiha edustaa havaitsemisrajaa (3 % CSA:sta) ja tällä viivalla havaitsemistodennäköisyys on 75 %. Jatkuvalle viivalla vian koko on 9 % CSA:sta ja havaitsemistodennäköisyys 95 %. Todennäköisyydet pätevät nimenomaan mainitulle sokkotestille. Muuten nämä arvot on otettava suuntaa-antavina, koska todellisessa tilanteessa monet muut seikat vaikuttavat tulokseen (hitsit, tuet, putken pinnan puhtaus jne).

Seuraavassa tarkastellaan esimerkkinä minkälaisia vikoja 9 % CSA ja 3 % CSA edustavat putkessa, jonka seinämän paksuus on 5 mm ja ulkohalkaisija 450 mm. Tällaisella putkella CSA on 6990 mm² ja 9 % CSA:sta on siis 629 mm². Jos vian syvyys on 2,5 mm, niin vian pituus kehäsuunnassa pitää olla 252 mm, jotta havaittavuus olisi ”varma”. Havaitsemisrajalla (3 % CSA:sta) saman syvyisen vian pituus kehäsuunnassa on 84 mm. Puhutaan siis aika isoista vioista. Mitä pienempiä korroosioläikkiä halutaan havaita, sitä lyhyemmäksi tulee kantama. Tätä riippuvuutta on karkeasti esitetty taulukossa 1. Mikäli vika, joka on kooltaan 10 % CSA:sta, halutaan havaita kantaman ääripäässä, on kantama erilaisissa sovellutuksissa taulukon mukainen (Lowe & Cawley, 2006). Hitsaustapa (kierrehitsi vai päittäishitsi, hitsikuvun koko) sekä putken geometria (hitsatut tuet, T-liitokset yms.) vaikuttavat kantamaan ja heijastajan tunnistamiseen lisäämällä vaimennusta ja/tai aiheuttamalla moodimuutoksia. Moodimuutos lisää vaimennusta, koska käytettävissä oleva äänienergia jakaantuu moodien kesken.



Kuva 9. Sokkotestin tuloksia. Sinisellä merkityt viat havaittiin, punaisella ei havaittu. Jatkuvalle viivalla CSA on 9 % ja katkoviivalla CSA on 3 %. Kuva Pereiran et al. (2002) mukaan.

Taulukko 1. GW tekniikan kantama erilaisissa sovellutuksissa (Lowe & Cawley, 2006).

Application	Typical Range in each direction (m)
Ideal conditions	80+
Typical 30 year old pipe with little internal or external corrosion	40
Typical 30 year old pipe with some general corrosion	20
Typical pipe wrapped in factory applied foam	15
Heavily generally corroded pipe	5
Bitumen coated pipe	5*

* Bitumipinnoitteen ominaisuudet voivat vaihdella paljon

5 Pohjoismaissa suoritettavat kokeilut GW tekniikalla

Plant Integrity Ltd on suorittanut laboratoriokokeen Ruotsissa sekä kenttämittauksia oikeilla kaukolämpöputkilla Helsingissä Teletest laitteella. Näissä testeissä anturipanta lähetti torsioaallon testattaviin putkiin. Lisäksi Force Technology on testannut kaukolämpöputkia Tanskassa ja Applus RTD Tsekissä. Seuraavassa esitetään yhteenveto näistä tuloksista. Käytettävissä olevat raportit eivät sisällä kovin paljon yksityiskohtia ja Tanskassa ja Tsekissä suoritetuista mittauksista ei ole käytettävissä raporttia lainkaan.

5.1 Ruotsissa vuonna 2004 suoritettut laboratorionkokeet

Laboratorionkokeissa käytettiin kolmea putkea:

- A) Putken halkaisija oli 100 mm ja putken pituus 6 metriä. Putkeen oli tehty neljä keinovikaa. Keinovikojen koot ilmenevät taulukosta 2.
- B) Hyvässä kunnossa oleva kaukolämpöputki, joka on poistettu käytöstä. Halkaisija 711 mm ja pituus noin 11 metriä.
- C) Tämä putki oli samanlainen kuin B) mutta korroosioaurioilla.

Ainakin putkea A) mitattaessa kokeiltiin Mudgen mukaan useita taajuuksia, tuloksia on kuitenkin esitetty vaan taajuudelle 35 kHz.

Taulukko 2. Putkeen A) työstetyt keinoviat (Mudge, 2004).

Aksiaalinen pituus, mm	Kehäsuuntainen pituus, mm	Likimääräinen syvyys, mm	Osuus seinän poikkipinta-alasta, %
80	25	1,6	>2,3
140	25	1,6	2,3
250	30	2,3	3,9
26	30	Läpireikä	noin 10

Kaikki neljä keinovikaa havaittiin Mudgen (2004) mukaan, mutta ainoastaan läpireistä saatu signaali ylitti raportointirajan. Mittauksen aikana putkessa oli ilmaa ja putken ulkopinnalle oli kääritty vuorivillaa. Mittauksia tehtiin sekä märällä että kuivalla villalla. Märkä villa ei sanottavasti vaikuttanut tulokseen.

Molemmissa käytöstä poistetuissa kaukolämpöputkissa B) ja C) oli poikittaishitsi. Tärkein anti näitten putkien testauksesta oli, että signaali vaurioituneesta putkesta C) oli selvästi erilainen kuin signaali hyvässä kunnossa olevasta putkesta B). Vaurioituneesta putkesta saadut korroosiosignaalit, eivät kuitenkaan ylittäneet raportointirajaa.

Putkeen A) oli tehty vain neljä keinovikaa, olisi ollut toivottavaa, että vikojen määrä olisi lisätty asteittain, jotta niiden yhteisvaikutus olisi tullut näkyviin. Enemmän tietoa korroosioaurion laajuudesta putkessa C) olisi ollut toivottavaa. Testi olisi ollut täydellisempi, jos olisi mitattu muutama putki eriasteisilla korroosioaurioilla. Lisäksi putket olisivat voineet olla pidempiä ja testejä olisi voitu tehdä myös vesitäytteisillä putkilla, ellei näin tehty (tästä asiasta ei raportissa mainita mitään).

Tämän raportin viimeistelyvaiheessa havaittiin, että Ruotsissa on myös tehty kenttäkokeita (Glas & Sund, 2006). Näitä tuloksia käsitellään lyhyesti kappaleessa 5.3.

5.2 Helsingissä vuonna 2005 suoritettut kenttäkokeet.

Plant Integrity Ltd suoritti 7. huhtikuuta kenttäkokeita Yliopistokadulla Helsingin keskustassa sekä Lepolantiellä Länsi-Pakilassa. Yliopistokadun putket olivat ulkohalkaisijaltaan 500 mm ja Lepolantiellä vastaava mitta oli 400 mm. Kaikki putket olivat kierrehitsattuja ja seinämänpaksuus oli 6-7 mm. Tässäkin käytettiin Teletestin laitetta ja anturipanta lähetti torsioaaltoja taajuudella 35 kHz. Mittauksia

tehtiin molemmissa paikoissa sekä meno- että tulopuolen putkille (Edwards, 2005). Putket olivat tiettävästi käytössä mittausten aikana, vaikka tämä ei ilmene raportista. Liitteessä 1 nähdään esimerkki Teletestmenetelmän tuottamasta testauspöytäkirjasta.

5.2.1 Yliopistokadun mittaukset

Yliopistokadulla tilanne oli sellainen, että anturipannan lähellä oli aina putkihaara ja/tai taivutuskohta. Haarojen ja taivutusten todellinen sijainti ja geometria eivät valitettavasti käy ilmi raportista (Edwards, 2005). Nämä vääristävät putken seinämässä etenevää ultraääniäaltoa ja hankaloittavat kaikusignaalien tulkintaa. Kuvassa 10 nähdään anturipanta kiinnitettynä paluuputken päälle. Taulukkoon 3 on kerätty anturipannasta kaukaisimmat (mahdollisesti) tunnistetut kaiut (Edwards, 2005) ja taulukko antaa siten karkean kuvan kantamasta tässä mittaustilanteessa.

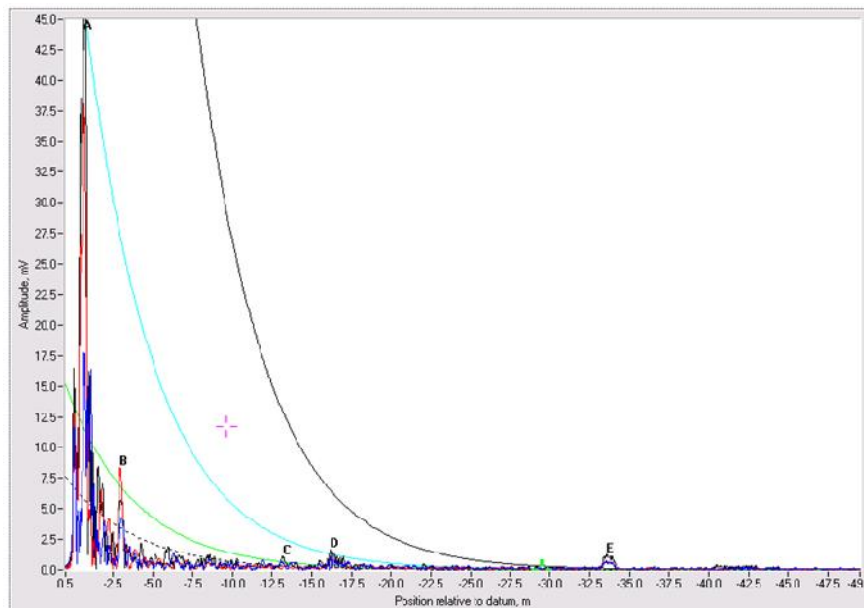
Kuvassa 11 nähdään esimerkkinä mittauksista saatu A-kuva (kaiun amplitudi etäisyyden funktiona). Vihreä käyrä on raportointiraja. Kaikusignaali on esitetty kolmena eri aaltomoodina: Symmetrinen (musta), vaakatasossa värähtelevä moodi (punainen) sekä pystytasossa värähtelevä moodi (sininen). Näiden moodien avulla on tunnistetut seuraavat indikaatiot: A) T-kappale, B) taivutuskohdan hitsi, C) mahdollinen vika (anomaly), D) T-kappale ja E) mahdollisesti putken päätykohta (Edwards, 2005). Kaukaisin indikaatio E on etäisyydellä 33,3 m (Taulukko 3). Tämä on kuitenkin vahva signaali (mahdollisesti putken pääty) ja kuvasta 11 on vaikea päätellä, olisiko vakavampiakaan korroosiovaurioita tunnistettavissa noin 16 metrin jälkeen; näyttää nimittäin siltä (ainakin tässä skaalassa), että vihreä raportointiraja tippuu kohinan tasolle jossain indikaatio D:n jälkeen. Tämä A-kuva on hyvä esimerkki siitä, miten T-kappaleet ja taivutuskohdat vaikeuttavat tulosten tulkintaa. Kaikissa Yliopistokadun mittaustuloksissa kaivattaisiin tarkempaa analyysiä siitä, millä etäisyydellä anturipannasta mahdollinen korroosiokaiku häviää kohinaan. Taulukossa 3 kaukaisimmat tunnistetut indikaatiot sijaitsevat etäisyyksillä 5,9 m, 17,5 m, 18,6 m ja 33,3 m anturipannasta, mutta tämä ei välttämättä tarkoita sitä, että suhteellisen vakavakin korroosiovaurio olisi tunnistettavissa näihin etäisyyksiin asti.

Taulukko 3. Anturipannasta kaukaisimmat tunnistetut heijastajat Yliopistokadun mittauksissa.

Sijainti pannasta, m	Putki	Äänen suunta	Heijastaja
18,6	Meno (Hot)	”Forward”	Haara/hitsi
33,3	Meno (Hot)	”Backward”	Mahd. putken pääty
5,9	Paluu (Cool)	”Forward”	Mahd. vika, ”minor anomaly”
17,5	Paluu (Cool)	”Backward”	Mahd. putkihaara



Kuva 10. Anturipanta kiinnitettynä paluuputken (cool pipe) päällä Yliopistokadulla (Edwards, 2005).



Kuva 11. Yliopistokadun mittauksissa saatu A-kuva. Vihreä käyrä on raportointiraja. Tunnistetut indikaatiot: A) T-kappale, B) taivutuskohdan hitsi, C) mahdollinen vika (anomaly), D) T-kappale ja E) mahdollisesti putken päätykohta (Edwards, 2005).

5.2.2 Lepolantien mittaukset

Kuvassa 12 nähdään anturipanta kiinnitettynä paluuputkeen (cool pipe). Näissä testeissä anturipanta oli kiinnitettynä suoriin putkiin, joten edellytykset olivat paljon paremmat kuin Yliopistokadun mittauksissa. Taulukkoon 4 on kerätty anturipannasta kaukaisimmat (mahdollisesti) tunnistetut kaiut (Edwards, 2005) ja taulukko antaa siten (hyvin) karkean kuvan kantamasta tässä mittaustilanteessa.

Kuvassa 13 nähdään esimerkki Lepolantien paluuputkesta (cold backward) saadusta A-kuvasta (kaiun amplitudi etäisyyden funktiona). Kaikusignaali on tässäkin esitetty kolmena eri aaltomoodina: Symmetrinen (musta), vaakatasossa värähtelevä moodi

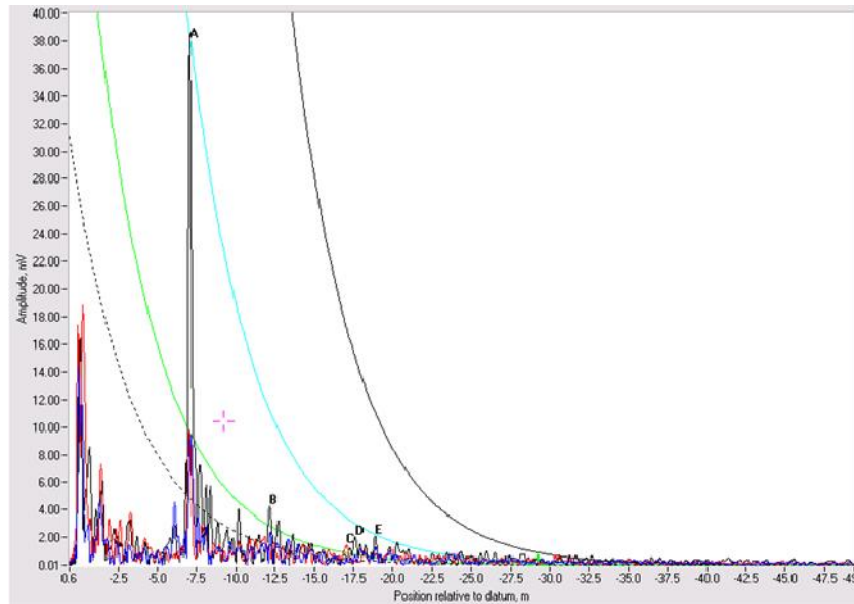
(punainen) sekä pystytasossa värähtelevä moodi (sininen). Tunnistetut indikaatiot: A) hitsi, B), C) ja D) mahdollisia vikoja (moderate anomalies) sekä E) hitsi. Menoputkesta (hot backward) löytyy myös potentiaalisia vikakaikuja paikasta, joka sijaitsee samaan suuntaan ja suunnilleen samalla etäisyydellä anturipannasta kuin paluuputkesta löydetyt potentiaaliset vikakaiut. Tämä viittaa siihen, että nämä kaiut edustavat todellisia ongelmakohtia (Edwards, 2005). Lepolantien putkista löytyi muitakin mahdollisia vikakaikuja (minor/moderate anomaly). Vaikka Lepolantien mittaukset onnistuivat paremmin kuin Yliopistokadun mittaukset kaivattaisiin tässäkin tarkempaa analyysyä siitä, millä etäisyydellä anturipannasta mahdollinen korroosiokaiku häviää kohinaan. Lisäksi tuloksissa esiintyy muutamassa kohdassa jälkikaiuntasignaaleja (reverberation), eli ääniaalto heijastuu useammasta heijastajasta, aiheuttanee valenäyttämiä.

Taulukko 4. Anturipannasta kaukaisimmat tunnistetut heijastajat Lepolantien mittauksissa.

Sijainti pannasta, m	Putki	Äänen suunta	Heijastaja
28,5	Paluu (Cool)	”Forward”	Jälkikaiunta
18,6	Paluu (Cool)	”Backward”	Hitsi
32,6	Meno (Hot)	”Forward”	Mahd. vika, ”moderate anomaly”
19,0	Meno (Hot)	”Backward”	Hitsi



Kuva 12. Anturipanta kiinnitettyä paluuputkeen (cool pipe) Lepolantiellä (Edwards, 2005).



Kuva 13. Lepolantien mittauksissa saatu A-kuva paluuputkesta (cold backward). Vihreä käyrä on raportointiraja. Tunnistetut indikaattorit: A) hitsi, B), C) ja D) mahdollisia vikoja (moderate anomalies) sekä E) hitsi (Edwards, 2005).

5.3 Muita kenttäkokeita

Myöhemmin kävi ilmi, että Ruotsissa on tehty laajempi kenttätesti kuin yllä mainittu testi Helsingissä (Glas & Sund). Tässäkin käytettiin Teletestin laitteistoa ja putket olivat kierrehitsattuja ja vuorivillalla, polyuretaanilla tai vaahtobetonilla eristettyjä. Kaikki putket olivat käytössä mittausten aikana. Testejä tehtiin Tukholmassa, Uppsalassa ja Göteborgissa. Kaikissa näissä testeissä käytettiin pitkittäistä aaltomoodia ja kantama oli 10 – 15 metriä. Melkein kaikissa mittauksissa taajuus oli 35 tai 36 kHz. Helsingissä kantama oli yleensä 18 – 30 metriä koska siellä käytettiin torsioaaltomoodia. On hieman epäselvä miksi Ruotsissa käytettiin pitkittäisaaltomoodia, koska torsiomoodin kantama on yleensä pitempi ja tätä moodia suositellaan kirjallisuudessa vesitäytteisille putkille. Aaltomoodin suhteen kyse voi olla myös erehdyksestä, sillä Glas & Sundin raportin liitteenä on 18 Teletestjärjestelmän tuottamaa testauspöytäkirjaa ja kaikissa paitsi kahdessa lukee ”Test wavemode Torsional” ja testauspöytäkirjassa annettu tieto on todennäköisesti oikea. Glas & Sund toteavat kuitenkin, että menetelmä näyttää toimivan luokittelutyökaluna, mutta lisää kokemusta tarvitaan, jotta tulosten perusteella voitaisiin suositella putkilinjan vaihtoa.

Force Technology Tanskassa on myös tehnyt GW mittauksia kaukolämpöputkilla käyttäen Guided Ultrasonics Ltd:n laitteistoa. Bertelsenin (2010) mukaan Forcella on hyvät kokemukset Guided Ultrasonics Ltd:n G3 laitteesta. Kuvassa 14 nähdään laitteiston panta kiinnitettynä kaukolämpöputkeen Kööpenhaminassa. Tästä työstä ei valitettavasti ole raporttia käytettävissä.



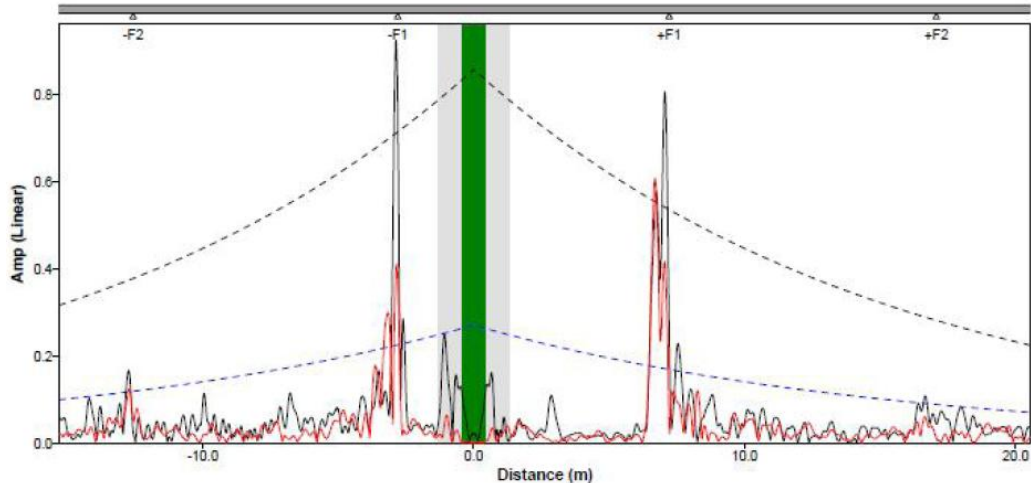
Kuva 14. Guided Ultrasonics Ltd:n panta kiinnitettyinä kaukolämpöputkeen Bredgadella Kööpenhaminassa (Bertelsen, 2010).

Kesäkuussa Force teki uuden mittauksen samalla laitteistolla Tanskassa ja kuvassa 15 nähdään anturipanta kiinnitettyinä kierrehitsattuun kaukolämpöputkeen. Putken lämpötila mittaushetkellä oli noin 80 °C. Kuvassa 16 nähdään A-kuva mittauksesta. korroosiota ei löytynyt ja kantama oli noin 20 metriä. Lisäksi Applus RTD on tehnyt GW mittauksia kaukolämpöputkilla Tsekissä käyttäen Guided Ultrasonics Ltd:n laitteistoa. Näissä mittauksissa löydettiin useita potentiaalisia korroosiovaurioita ja kantama oli noin 20 m (Wassink, 2010).



Kuva 15. Forcen tekemä GW mittaus Tanskassa kesäkuussa 2010. Putki oli kierrehitsattu ja lämpötila oli noin 80°C (Bertelsen, 2010).

Feature	Location	Size (mV)	ECL	Extent	Class	Notes
-F1	-2.8	0.84	-	50	Weld. sup.	
+F1	7.21	0.796	-	60	Weld. sup.	
+F2	17.07	0.145	-	60	Weld. sup.	
-F2	-12.56	0.134	-	0	Weld. sup.	



Kuva 16. A-kuva kuvassa 15 esitetystä mittaustilanteesta. Hitsatuista tuista tulevat kaiut nähdään kohdissa -F2, -F1, +F1 ja +F2. Korroosiota ei löytynyt (Bertelsen, 2010).

5.4 Kokeista saatu yleisvaikutelma

Yllä käsitellyt laboratorio- ja kenttäkokeet olivat luonteeltaan ”demoja” ja puolustavat sellaisina paikkaansa. Tuloksista on vaikeata vetää johtopäätöksiä GW tekniikan soveltuvuudesta kaukolämpöputkien testaukseen, koska mittaustuloksia on vähän ja analyysi (ja raportointi) on liian suppeaa. Voidaan kuitenkin todeta, että Yliopistokadun putket olivat turhan vaativa kohde tällaiseen demoon. Testaamalla enemmän samankaltaisia putkia kuin Lepolantiellä olisi saatu enemmän materiaalia tilastolliseen analyysiin.

Yhteenvedon voidaan todeta, että nämä pohjoismaissa tehdyt kokeet ovat olleet ensimmäisiä askeleita kohti GW tekniikan soveltuvuuden evaluointia kaukolämpöputkien korjaustarpeen ajoitukseen. Aineisto on liian suppea ja raportointia ei ole tehty riittävällä huolellisuudella. Ulkopuolisen on melkein mahdotonta saada mitään selvää raporttien liitteinä olevista A-kuvista. Hyödyllinen kantama jää epäselväksi. Ruotsissa todettiin kenttämittausten perusteella, että kantama oli 10 – 15 m, kun taas Helsingissä tehtyjen mittausten perusteella kantama oli 18 – 30 m. Tanskassa saatu kantama oli reilut 20 m. Mitään selvää selitystä näille eroille ei löytynyt (mikäli Ruotsissa ei käytetty pitkittäismoodia). Pienin havaittava vika on yleensä 3 % CSA:sta ja ”varmasti” havaittavan vian koko on 9 % CSA:sta. Olisi mielenkiintoista tietää millaisella signaali-kohinasuhteella näitä havaitaan kantaman ääripäässä. Kokeista voidaan kuitenkin päätellä, että huonosta putkesta saatu signaali eroaa selvästi hyvästä putkesta saadusta signaalista. Laboratoriokokeissa havaittiin vikoja, joiden osuus CSA:sta oli alle 3 %. Yllä mainittiin, että GW mittauksia kaukolämpöputkilla on tehty myös Tanskassa ja Tsekissä. Tiedot näistä mittauksista perustuvat henkilökohtaiseen tiedonvaihtoon eikä varsinaisiin testausraportteihin.

6 Johtopäätökset ja suositukset

Tässä työssä on tutkittu Guided wave tekniikan erityispiirteitä, keskusteltu alan asiantuntijoiden kanssa ja mahdollisuuksien mukaan tutustuttu Euroopassa tehtyihin GW mittauksiin kaukolämpöputkilla. Tulosten perusteella GW tekniikalla on selvää potentiaalia toimia työkaluna kaukolämpöputkistojen korjaustarpeen arvioinnissa. Tekniikka ei kelpaa pienten pistemäisten vuotokohtien etsimiseen, mutta isohkot korroosioläikät pitäisi kyllä löytyä. Kirjallisuuden mukaan korroosioalue, jonka osuus putken seinämän pituussuuntaisesta poikkipinnasta (CSA:sta) on vähintään 9 %, pitäisi löytyä kantaman sisällä noin 95 prosentin varmuudella. Detektointirajaksi ilmoitetaan usein 3 % CSA:sta, mutta luku 1 % esiintyy myös. Tekniikka toimii parhaiten suorilla putkiosuuksilla. Hitsit, mutkat, hitsatut tuet ja T-liitokset huonontavat tilannetta sekä lyhentävät kantamaa, mutta taitava operaattori pystyy jossain määrin löytämään vikoja näistäkin kohdista. Tässä tarkasteltujen mittausten perusteella kantama on 20 – 30 metriä anturipannasta molempiin suuntiin. Kaikkein epäsuotuisimmissa tapauksissa kantama voi jäädä muutama metriin. MsS anturi on hyvin yksinkertainen ja halpa, mutta se ei pysty tunnistamaan värähtelymoodeja. Siksi tämä tekniikka ei sovellu kovin hyvin kaukolämpöputkistojen verrattain vaativaan testaukseen. Jäljelle jää siis pietsoantureihin perustuva tekniikka. GW tekniikka vaatii operaattorilta paljon ja jos operaattorilla ei ole tarpeeksi koulutusta ja kokemusta, tulokset saattavat jäädä hieman sattumanvaraisiksi.

6.1 Jatkotutkimus

Tässä työssä saatujen tietojen perusteella kirjoittajat suosittelevat siirtymistä seuraavaan vaiheeseen, jossa tekniikan todellista suorituskykyä selvitetään laajahkolla kenttämittaussarjalla sekä datan huolellisella analyysillä yhteistyössä sopivan testauspalveluntarjoajan ja laitevalmistajan kanssa. Tässä työssä pitäisi myös pyrkiä luokittelemaan putkistot kuntoluokkiin. Testausohjelmaan pitäisi sisällyttää myös jonkinlainen verifiointi luokittelutuloksista ja ainoa tapa lienee putkilinjan avaaminen ainakin niiltä osuuksilta, missä GW testaus on löytänyt korroosioon viittaavia indikaatioita. Tutkimuksen päävaiheet:

1. Sopivan konsortion valitseminen
2. Tutkittavien kaukolämpölinjojen valitseminen siten, että GW tekniikan suorituskyvystä saadaan mahdollisimman luotettavaa tietoa. Ei kannata aloittaa geometrialtaan kaikkein vaikeimmilta linjoilta. Valinta kannattaa tehdä yhdessä testauspalvelun tuottajan ja/tai laitevalmistajan kanssa.
3. Tulosten analyysistä ja raportointitavasta kannattaa sopia etukäteen, jotta tulokset esitetään ymmärrettävässä muodossa myös ei asiantuntijalle. Tulosten esittäminen graafisessa muodossa (esimerkiksi C-kuvina, ”unrolled pipe”) on mahdollisuuksien mukaan suositeltavaa. Hyödyllinen kantama pitää käydä ilmi jokaisesta mittauksesta.
4. Mitattujen putkilinjojen luokittelu esimerkiksi kolmeen luokkaan korjaustyön kiireellisyyden mukaan.
5. Verifioidaan edellisen kohdan luokittelu.

Tekniikassa on tapahtunut kehitystä sen jälkeen, kun tässä työssä tarkastetut GW mittaukset tehtiin. Kannattaa seurata, mitä alalla tapahtuu tällä hetkellä. Tällaisia uudempia kehitysaskleita ovat esimerkiksi:

- C-kuvien tuottaminen (unrolled pipe display)
- Fokusointi
- Taajuuspyyhkäisy (frequency sweeping). Tällä tekniikalla saadaan A- ja C-kuvia eri taajuuksille.

Yllä mainituista tekniikoista saatava lisäarvo kannattaa selvittää. Suomestakin löytyy nykyään GW laitteisto. Inspecta on hankkinut Guided Ultrasonics Ltd:n Wavemaker G3 laitteiston sekä kouluttanut henkilökuntansa suorittamaan GW testauksia. Tämä avaa uusia mahdollisuuksia yhteistyölle kotimaisessa konsortiossa.

7 Yhteenveto

GW tekniikan vahvuus on siinä, että sillä voidaan nopeasti testata pitkiä putkiosuuksia ja identifioida potentiaaliset ongelmakohdat putken ollessa käytössä ja poistamatta eristeitä. Alan kirjallisuudessa puhutaan usein 100 % testauksesta. Tässä pitää kuitenkin huomioida, että hitseissä, hitsatuissa tuissa, mutkissa ja T-liitosten lähellä olevat viat eivät välttämättä ole helposti tunnistettavissa. Menetelmän havaitsemisrajaksi ilmoitetaan yleensä 3 % CSA:sta (Cross Sectional Area). Vika, jonka osuus CSA:sta on 9 % tai suurempi havaitaan ”varmasti”. Nämä ovat varsin suuria vikoja, mutta GW tekniikka onkin tarkoitettu korroosioläikkien etsimiseen eikä pienten pistemäisten vuotokohtien etsimiseen. Seuraavassa esimerkissä tarkastellaan mitä ”varsin suuri vika” tarkoittaa putkelle, jonka ulkohalkaisija on 150 mm ja seinämänpaksuus 6 mm. Kaikki seuraavat viat ovat noin 4 % CSA:sta:

- 0,25 mm syvä vika, joka ulottuu kokonaan putken ympäri
- 1,5 mm syvä vika, jonka pituus kehäsuunnassa on 75 mm
- 3,0 mm syvä vika, jonka pituus kehäsuunnassa on 40 mm

Jotkut asiantuntijat uskovat, että havaitsemisrajaa pystytään pienentämään 1 % CSA:sta ainakin suotuisimmissa tapauksissa. Varteenotettavia laitetoimittajia on edelleen vain kolme: Guided Ultrasonics Ltd (tuotenimi Wavemaker) ja Plant Integrity Ltd (tuotenimi Teletest) Englannissa sekä Southwest Research Institute, Yhdysvalloissa (MsS tekniikka). Plant Integrity on The Welding Instituten (TWI) tytäryhtiö. MsS tekniikka ei nykymuodossa pysty tunnistamaan värähtelymoodeja, joten se ei sovellu kovin hyvin verrattain vaativaan kaukolämpöputkien testaukseen. Tilanne voi kuitenkin olla toinen, mikäli halutaan jatkuvaa monitorointia pysyvästi asennetulla anturipannalla, koska MsS panta on hyvin halpa muihin verrattuna. GW testauspalvelujen tuottajia löytyy useita ja osa niistä on listattu liitteessä 2. Tämän raportin tulosten perusteella käytössä olevia kaukolämpöputkia on testattu GW tekniikalla ainakin Suomessa, Ruotsissa, Tanskassa ja Tsekissä. Suomessa ja Ruotsissa käytettiin Teletest laitteistoa ja testien suorittajana toimi Plant Integrity Ltd. Tanskassa testit suoritti Force Technology ja Tsekissä Applus RTD. Sekä Force että Applus käyttivät Guided Ultrasonics Ltd:n laitteistoja. GW tekniikan kantaman ilmoitetaan yleensä olevan noin 30 metriä molempiin suuntiin anturipannasta (ja jopa 100 m suotuisissa olosuhteissa). Ruotsissa kantamaksi saatiin 10 – 15 metriä ja Suomessa kantama oli 20 – 30 metriä. Pahimmissa tapauksissa kantama jäi muutamaan metriin. Tanskan ja Tsekin mittauksista ei ole raportteja käytettävissä, mutta kantamaksi ilmoitettiin runsaat 20 metriä. Ainakin Suomessa, Ruotsissa ja Tanskassa putket olivat kierrehitsattuja. Käytettävissä olevien raporttien perusteella vaikuttaa siltä, että menetelmä on hyödyllinen kaukolämpöputkien korjaustarpeen

ajoitukseen. Esimerkiksi huonosta putkesta saatu signaali eroaa selvästi hyvästä putkesta saadusta signaalista. Testausaineistoa on kuitenkin edelleen niukasti eikä analyysejä ole tehty kovin syvällisesti ainakaan julkisesti saatavissa olevan materiaalin mukaan. Jotta Guided wave tekniikan hyödyllisyydestä saataisiin täsmällisempää tietoa, kaivattaisiin laajempia kenttämittauksia perusteellisine analyyseineen, jossa myös pyritään luokittelemaan putkilinjoja kuntoluokkiin. Tämän raportin kirjoittajat suosittelevat uuden tutkimuksen käynnistämistä, jotta saadaan riittävää tilastollista näyttöä GW tekniikan käyttökelpoisuudesta kaukolämpöputkien kunnan luokitteluun.

Lähdeviitteet

Acciani, G., Brunetti, G., Fornarelli, G. & Giaquinto, A. 2010. Angular and axial evaluation of superficial defects on non-accessible pipes by wavelet transform and neural network-based classification. *Ultrasonics*, 50, pp. 13-25.

Bertelsen, P. Force Technology. Henkilökohtainen tiedonvaihto.

Bertoncini, F., Raugi, M. & Turcu, F. 2008. Pipeline long-range inspection and monitoring by an innovative magnetic collar for magnetostrictive guided-wave systems. Internet osoite 2010-06-11: www.ndt.net/search/docs.php3?MainSource=25

Edwards, G. 2005. Demonstration of the Teletest Long Range Ultrasonic Testing of District Heating Pipes in Helsinki. Plant Integrity Ltd. Pi Contract No: LC0505. 4 p. + App.

Edwards, G. 2006. Long Range Ultrasonic Testing – New Markets for new Technology. Internet osoite 2010-06-16: www.lrucm.eu.com/publications/lrut_new_markets_for_new_technology.pdf

Edwards, G., R. & Gan, T.-H. 2007. Detection of Corrosion in Offshore Risers using Guided Ultrasonic Waves. Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2007, June 10-15, 2007, San Diego, California, USA. 8 p.

Glas, A. & Sund, G. 2006. Ultraljudsprovning med Teletestmetoden. Utvärdering av fältförsök på fjärrvärmerör. Svensk Fjärrvärme AB. ISSN 1401-9264. 39 s. + 5 liitettä.

Guided Ultrasonics Ltd. Internet osoite 2010-06-18: www.guided-ultrasonics.com/

GWA brochure. Magnetostrictive Sensor System (MsS) for Long Range Guided Wave Inspection and Structural Health Monitoring. Internet osoite 2010-06-28: www.gwanalysis.com/

Kwun, H. 2010. Southwest Research Institute. Henkilökohtainen tiedonvaihto.

Kwun, H., Parvin, A., J. & Peterson, R., H. 2010. Flexible plate magnetostrictive sensor probe for guided-wave inspection of structures. United States Patent Application 0052669A1.

Lowe, M., J., S. & Cawley, P. 2006. Long Range Guided Wave Inspection – Current Commercial Capabilities and Research Directions. Imperial College, London. Internet osoite 2010-06-28: <http://workspace.imperial.ac.uk/nde/Public/55745699.pdf>.

Mudge, P., J. 2004. Demonstration of the Teletest Long Range Ultrasonic System. Plant Integrity Ltd. Pi contract No: 0425. 8p.

Mudge, P, Catton, P., Kayous, M. & Gan, T.-H. 2008. Application of guided wave technology for long range inspection of oil and gas pipelines. Internet osoite 2010-06-16: www.ndt.net/article/dgzfp-utgw-2008/Paper08.pdf

Pasonen, M. & Hakkarainen, T. 2006. Kaukolämpölinjojen elinikä ja NDT. VTT Working Papers 53. 27 p. Internet osoite 2010-06-15: www.vtt.fi/publications/index.jsp

Pereira, M., Mudge, P. J., Brown, C.W. & Freire, I. J. 2002. Field experience of long range ultrasonic testing. 6^a Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos. Internet osoite 2010-06-17: www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material/PDF/COTE153.PDF

Rose, J. L., Sun, Z., Mudge, P. J. & Avioli, M. 2003. Guided wave flexural mode tuning and focusing for pipe testing. Materials Evaluation. s. 162-167.

Rose, J. L., Cho, Y. & Avioli, M. 2009. Next generation guided wave health monitoring for long range inspection of pipes. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22, pp. 1010-1015.

Silverwing. Internet osoite 2010-06-16: <http://www.silverwingme.com/brochures/G3.pdf>

Turcu, F. 2009. Guided Wave – NDT. Advanced Sensors for Pipeline Monitoring. vdm Verlag Dr. Müller Aktiengesellschaft & Co. KG.Saarbrücken. 118 p.

Turcu, F. 2010. Henkilökohtainen tiedonvaihto.

Wassink, C. 2010. Henkilökohtainen tiedonvaihto.

Weber, W. H. 2005. Guided Wave Ultrasonics – An Effective Screening Tool. Internet osoite 2010-06-23: www.coastnde.com/Coast/Presentation/NACE2005.ppt

LIITE 1

<i>Plant Integrity Teletest Report</i>				
Client	<input type="text" value="Helsinki Energy"/>		Procedure	<input type="text" value="GRE1"/>
Test location	<input type="text" value="Yliopistokatu"/>		Data file	<input type="text" value="test2 back.ttd"/>
Pipe ident.	<input type="text" value="Kb hot"/>		Datum position	<input type="text" value="Vslve"/>
Job number	<input type="text" value="GRE123"/>		Other info.	<input type="text" value="spiral welded pipe"/>
Collection date/time	<input type="text" value="7/4/2005"/>	<input type="text" value="09:28:52"/>		
Pipe OD/wall (mm)	<input type="text" value="500.0"/>	<input type="text" value="6.30"/>		
Test length (m)	<input type="text" value="35.00"/>			
Interpreter	<input type="text" value="GRE"/>			
			Test direction	<input type="text" value="Backwards"/>
			Test wavemode	<input type="text" value="Torsional"/>
			Processing	<input type="text" value="3 ring unidirectional"/>
Indications				
	Position relative to datum, m	Amplitude relative to threshold, dB	Description	Decision
A	-0.41	11.74	Symmetrical Response	T-Piece
B	-2.72	1.73	Horizontal Flexural Response	Bend Weld
C	-12.95	4.66	Symmetrical Response	Moderate Anomaly
D	-15.95	14.29	Symmetrical Response	T-Piece
E	-33.33	46.48	Symmetrical Response	Possible pipe end
Remarks				
File rev.3		Signature:		Teletest_nd.exe v1.32_nd 9/6/2005

LIITE 2**GW testauspalvelujen tuottajia, pietsotekniikka**

- Applus RTD corporate, Rivium 1e straat 80, 2909 LE Capelle aan den IJssel, The Netherlands. Contact person: Casper Wassink. Email: casper.wassink@applusrtd.com
- FORCE Technology, Brøndby, Park Allé 345, 2605 Brøndby, Denmark. Contact: Jens Peter Bertelsen. Email: jsb@force.dk
- Inspecta, PL 94 (Miestentie 3), 02151 Espoo, Finland. Contact: Sauli Heikkinen. Email: Sauli.Heikkinen@inspecta.fi
- NDT Equipment Services Ltd, 157 Central Avenue, Billingham, Cleveland, TS23 1LF, United Kingdom. Contact: Mike Walker. Email: mike@ndtequipment.co.uk
- Plant Integrity Ltd, Granta Park, Great Abington, Cambridge, CB21 6GP, United Kingdom. Contact: pi@twi.co.uk
- SGS – The Netherlands B.V, Malledijk 18, 3208 LA Spijkenisse, The Netherlands. Contact: Jos de Visser. Email: Jos.deVisser@sgs.com

GW testauspalvelujen tuottajia, MsS tekniikka

- Applus RTD corporate, Rivium 1e straat 80, 2909 LE Capelle aan den IJssel, The Netherlands. Contact person: Casper Wassink. Email: casper.wassink@applusrtd.com
- Guided Wave NDT (University of Pisa), Pisa, Italy. Contact: Florin Turcu. Email: florin.turcu@guidedwave-ndt.com
- NDT Consultants Ltd, Middlemarch House, Siskin Drive, CV3 4FJ, Coventry, United Kingdom. Contact: D. S. Dulay. Email: Dulay@ndt-consultants.co.uk
- Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, USA. Contact: Hegeon Kwun. Email: hegeon.kwun@swri.org