



BTO 2014.021 | Juli 2014

## BTO rapport

CT-scan voor begraven  
leidingen



# BTO

CT-scan voor begraven leidingen

BTO 2014.021 | April 2014

Opdrachtnummer

400695/018

Projectmanager

Nellie Slaats

Opdrachtgever

BTO - Verkennend onderzoek

Kwaliteitsborger(s)

Mirjam Blokker

Auteur(s)

Peter van Thienen

Verzonden aan

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.

Een jaar na publicatie is het openbaar.

Jaar van publicatie  
2014

Meer informatie  
Peter van Thienen  
T 602  
E [peter.vanthienen@kwrwater.nl](mailto:peter.vanthienen@kwrwater.nl)

PO Box 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511  
F +31 (0)30 60 61 165  
E [info@kwrwater.nl](mailto:info@kwrwater.nl)  
I [www.kwrwater.nl](http://www.kwrwater.nl)



BTO | April 2014 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

# Samenvatting

Niet-destructieve conditiebepaling van begraven leidingen blijft voor de drinkwaterbedrijven een heilige graal. De mogelijkheden en grenzen van een techniek die is geïnspireerd op medische scanners zijn onderzocht in het Verkennend Onderzoek. Toepassing hiervan blijkt alleen op zeer beperkte schaal (<10 m) mogelijk.

Belang: eenvoudige inspectie van begraven leidingen

De ondergronds leidingnetwerken van de Nederlandse drinkwaterbedrijven zijn het resultaat van een combinatie van groei en vervanging over een periode van 150 jaar, en dientengevolge sterk heterogeen wat betreft materiaal, ouderdom en conditie van de leidingen. De conditie kan ook binnen cohorten leidingen van bijvoorbeeld gelijke ouderdom sterk variëren. Conditiebepalingsmethoden zijn nodig om te zorgen dat leidingen en trajecten die er qua conditie het meest aan toe zijn, ook het eerst worden vervangen. Bovendien maken ze het mogelijk leidingen en trajecten te handhaven, die hun theoretische levensduur hebben overschreden, maar nog in goede conditie zijn.

Conditiebepalingsmethoden kennen in het algemeen twee belangrijke technische beperkingen. In de eerste plaats geven de veelgebruikte destructieve tests slechts een puntmeting, omdat een buisdeel worden uitgenomen. Ten tweede zijn de bestaande, niet-destructieve technieken voor conditiebepaling van begraven leidingen óf nauwkeurig maar ingrijpend, omdat ze in-line (in de buis) worden toegepast, óf niet ingrijpend (men blijft buiten de buis) maar daarmee ook veel minder nauwkeurig. Daarnaast is toepassing van deze technieken vaak duur. Er is dus ruimte voor een nieuwe techniek met de genoemde voordelen, maar zonder de nadelen

Aanpak: tomografie op basis van ultrasone golven in de buiswand

In de medische sector worden zogenaamde tomografische technieken veel toegepast om op niet-destructieve wijze de inwendige conditie van patiënten vast te stellen. In dit project wordt gekeken in hoeverre deze technieken, die werken met een elastisch golfveld (ultrageluid), mogelijk toepasbaar zijn voor de in situ conditiebepaling van begraven leidingen (dus zonder uitname), of een dergelijke methode meerwaarde biedt ten opzichte van bestaande niet-destructieve conditiebepalingstechnieken en wat de maximaal te inspecteren leidinglengtes zijn. Daarvoor is gesproken met experts op dit gebied van TNO en is een literatuurstudie uitgevoerd.

Resultaten: weinig kansrijk voor begraven leidingen

Ultrasone tomografie behelst de vorming van een beeld van lokale variaties in de voortplanting van ultrasone elastische golven, opgewekt aan het ene eind van de te inspecteren sectie en opgevangen aan het andere eind. De techniek maakt gebruik van het feit dat golfvoortplanting wordt beïnvloed door variaties in effectieve wanddikte en defecten. Op basis van dit verkennende onderzoek lijkt de grootste hindernis voor toepassing van ultrasone tomografie op begraven leidingen de demping van de golf te zijn. Met enkele meters (lengterichting van de buis), kan de golfenergie met een factor 1000 of meer afnemen. Voor PVC en AC komt deze demping voort uit de absorptie door visco-elastische

materiaalcomponenten. Bij alle materialen vindt er bovendien een aanzienlijk lekkage van golfenergie naar de ondergrond plaats. Hiermee blijft de mogelijke toepassing van de methodiek beperkt tot afstanden kleiner dan 10 meter (lengterichting buis) voor staal en gietijzer. Zo wordt toepassing van deze methode niet minder ingrijpend dan die van bestaande niet-destructieve inspectiemethoden.

Implementatie: houd de ontwikkelingen in de gaten.

Aangezien de toepassing van tomografische conditiebepaling op begraven drinkwaterleidingen op dit moment weinig kansrijk lijkt, wordt aanbevolen nu geen energie te steken in ontwikkeling van dergelijke methoden voor drinkwaterleidingmaterialen. Het kan echter interessant zijn om de methodiek zoals deze reeds door TNO wordt toegepast op stalen leidingen een keer in het veld te beproeven op een stalen of gietijzeren leiding, voordat deze wordt uitgenomen voor destructieve conditiebepaling. Zo kan worden vastgesteld of de tomografische methode bruikbaar is voor het bepalen van de noodzaak van uitname van leidingsegmenten. De ontwikkelingen staan echter niet stil. Het is denkbaar dat meer geavanceerde technieken zullen worden ontwikkeld, die de toepasbaarheid op drinkwaterleidingen mogelijk vergroten. Daarom wordt aanbevolen de ontwikkelingen op het gebied van tomografische conditiebepaling, met name de zogenaamde diffractietomografie, buiten de watersector te blijven volgen.

# Inhoud

Samenvatting	2
Inhoud	4
1 Inleiding	5
1.1 Aanleiding	5
1.2 Doelstelling	6
1.3 Benadering	7
1.4 Leeswijzer	7
2 Tomografie	8
2.1 Principe	8
2.2 Beoogde toepassing	9
2.3 Basisconfiguratie	9
3 Voortplanting van geluid in begraven leidingen	10
3.1 Inleiding	10
3.2 Golftypes	10
3.3 Golfmodes	10
3.4 Dispersiecurves	10
3.5 Damping	11
3.6 Gebruik van voortplantingseigenschappen voor tomografische reconstructies	11
4 Bestaande uitwerkingen en implementaties	13
4.1 Wetenschappelijke literatuur	13
4.2 Praktijktoeepassingen	13
5 Verwachtingen m.b.t. toepasbaarheid op begraven drinkwaterleidingen	16
5.1 Inleiding	16
5.2 Dispersiecurves	16
5.3 Bereik	16
5.4 Omvang van variaties in wanddikte en defecten	18
5.5 Samenvattend: slagingskans tomografische inspecties	18
6 Conclusies en aanbevelingen	20
6.1 Conclusies	20
6.2 Aanbevelingen	20
7 Referenties	21
• Bijlage I: Gespreksverslag Tim van Zon en Paul van Neer (TNO)	24

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

De ondergronds leidingnetwerken van de Nederlandse drinkwaterbedrijven zijn het resultaat van een combinatie van groei en vervanging over een periode van 150 jaar, en diengevolge sterk heterogeen wat betreft materiaal, ouderdom en conditie van de leidingen. Voor een significant deel van de leidingpopulatie geldt dat de technische levensduur de komende decennia zal worden overschreden. **Om deze “saneringsbult” te lijf te gaan**, starten drinkwaterbedrijven nu reeds met het opvoeren van investeringen in saneringen. De analyse van storings- en conditiebepalingsgegevens (o.a. Mesman en Slaats, 2003, Vonk, 2014) toont echter dat er binnen cohorten een aanzienlijke variatie in conditie kan bestaan. Het is daarom zinvol om een prioritering aan te brengen in de saneringsplannen op basis van de werkelijke conditie van leidingen, zodanig dat die leidingen/trajecten die er het slechtst aan toe zijn het eerste worden vervangen en die leidingen/trajecten die weliswaar hun theoretische levensduur hebben overschreden maar in werkelijkheid nog in goede conditie zijn vooralsnog worden gehandhaafd.

Voor de verschillende leidingmaterialen worden verschillende technieken voor de bepaling van de conditie toegepast. Een overzicht van gangbare technieken voor de meest voorkomende materialen is weergegeven in Tabel 1. Een completer overzicht van mogelijk toepasbare technieken wordt gegeven door Marlow et al. (2007).

Hiernaast kunnen recente ontwikkelingen op het gebied van de bepaling van hoekverdraaiingen op basis van CCTV-technieken (Arsénio, 2013) en lopend onderzoek bij Wetsus naar bepaling van restlevensduur op basis van akoestische metingen (Wetsus, 2014) worden genoemd.

Het algemene beeld dat hieruit volgt is dat:

- bij veelgebruikte destructieve tests een buisdeel moet worden uitgenomen en men hiermee slechts een puntmeting verkrijgt;
- bestaande, niet-destructieve technieken om de conditie van begraven leidingen te bepalen zijn mogelijk nauwkeurig, maar ingrijpend omdat ze in-line (in de buis) worden toegepast (toegang, besmettingsrisico, etc.), of niet ingrijpend (men blijft buiten de buis) maar daarmee veel minder nauwkeurig.

In de medische sector worden zogenaamde tomografische technieken veel toegepast om op niet-destructieve wijze de inwendige conditie van patiënten vast te stellen. Deze technieken zijn gebaseerd op het reconstrueren van inwendige structuren op basis van gemeten resultaten van interacties van deze structuren met een fysisch veld. In het kader van het BTO-onderzoek is bij KWR ervaring opgedaan met tomografische technieken voor de studie van het gedrag van gesuspendeerde deeltjes tijdens transport in het leidingnet. In dit project wordt gekeken in hoeverre deze technieken mogelijk toepasbaar zijn voor de *in situ* conditiebepaling van begraven leidingen. Het meest voor de hand liggende fysische veld dat hiervoor kan worden gebruikt is een elastisch golfveld, aangezien dit gemakkelijk is op te wekken.

Tabel 1: Overzicht van in gebruik zijnde technieken voor conditiebepaling (gebaseerd op De Kater et al., 2010, Beuken et al., 2011)

Materiaal	techniek	beschrijving	opmerking
AC	fenolftaleinetest	verkleuringstest op verse breukvlakken om te bepalen welk deel van de wand niet is uitgeloozd	destructief, lokaal
	echopuls (Echologics)	op twee plaatsing op een leidingtracé wordt elders opgewekt geluid (spuien, hamerslag) opgevangen, waarmee een gemiddelde wanddikte voor het tussenliggende tracé wordt bepaald	niet-destructief, niet-inwendig, afstanden van 10-150 m
	georadar	reflecties en demping van radargolven worden geïnterpreteerd in termen van effectieve wanddikte	uitwendig met opgraving van leiding of inwendig met sonde in de buis; niet-destructief, afstanden van enkele honderden meters
gietijzer	handmatige meting corrosiediepte	na zandstralen van uitgenomen buisdeel ter verwijdering van de corrosielagen kan de corrosiediepte worden gemeten	destructief, lokaal
	Acoustic Resonance Technology (ART, Breivoll)	akoestische inspectie van buiswand in radiële richting met behulp van sonde in de buis	sonde in de buis, niet-destructief, langere afstanden
	Broad Band elektromagnetische technieken	toestand van een leidingsectie wordt bepaald op basis van interactie van de leiding met een opgewekt elektromagnetisch veld	in of op de buis, niet-destructief maar wel uitgebruikname (drukloos)
	echopuls (Echologics)	zie hierboven	zie hierboven
PVC	DCMT-test	de mate van gelering (tijdens het productieproces) wordt bepaald	destructief, lokaal

## 1.2 Doelstelling

Het doel van dit project is om te bepalen of een akoestische/ultrasone tomografische conditiebepaling van begraven leidingen op basis van voortplanting van geluid door de buiswand mogelijk is, meerwaarde biedt ten opzichte van bestaande niet-destructieve conditiebepalingstechnieken, en wat maximale te inspecteren leidinglengtes zijn.

De voorgestelde, niet-destructieve benadering is mogelijk in staat om een nauwkeurig beeld van de conditie te vormen, zonder dat hierbij toegang tot het inwendige van de buis nodig is. Hiermee zouden de voordelen van de twee hierboven genoemde benaderingen worden



gecombineerd en de nadelen geëlimineerd. Uitgangspunt hierbij is dat toegang wordt verkregen tot de buis via beperkte, lokale graafwerkzaamheden en dat een meting kan worden uitgevoerd zonder de integriteit van een leiding te verstoren. De maximale omvang van op deze wijze te inspecteren leidingsecties wordt in dit rapport ingeschat.

### 1.3 Benadering

Om de mogelijke toepasbaarheid en de grenzen van akoestische of ultrasone tomografie voor de conditiebepaling van begraven leidingen te verkennen is enerzijds een gesprek gevoerd met experts van TNO op het gebied van tomografische inspecties in de olie-industrie (zie Bijlage I) en is anderzijds een literatuurstudie uitgevoerd.

### 1.4 Leeswijzer

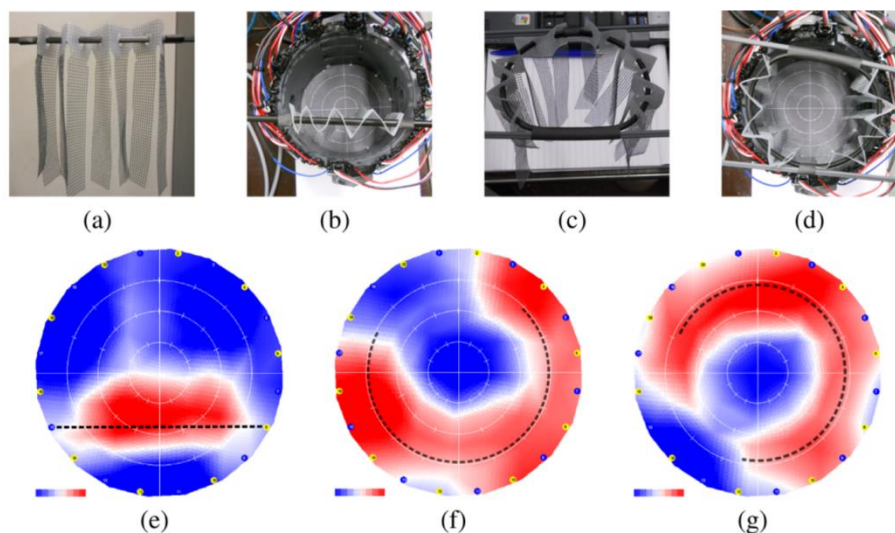
Allereerst wordt in hoofdstuk 2 de tomografische methode in het algemeen behandeld. Vervolgens schetst hoofdstuk 3 de context voor toepassing van ultrasone tomografie op drinkwaterleidingen door relevante aspecten van de voortplanting van (ultra)geluid in deze leidingen te beschrijven. In hoofdstuk 4 wordt een overzicht gegeven van in de literatuur beschreven en in de praktijk aangeboden methoden voor tomografische inspectie van leidingen. De algemene bevindingen van hoofdstuk 3 en 4 worden toegespitst op het drinkwaterdistributienet in hoofdstuk 5, waarbij een verwachting van toepasbaarheid voor de verschillende materialen wordt uitgesproken. Ten slotte somt hoofdstuk 6 de conclusies van dit verkennende onderzoek op en biedt aanbevelingen.

## 2 Tomografie

### 2.1 Principe

Het woord tomografie is afgeleid van de woorden  $\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$  (tomos, snede) en  $\gamma\rho\alpha\phi\epsilon\iota\nu$  (grafein, schrijven), en wordt gebruikt voor niet-invasieve of niet-destructieve technieken om het inwendige van objecten te bekijken. Bekende voorbeelden zijn CT- en PET-scans (*Computer Tomography* respectievelijk *Positron Emission Tomography*) uit de medische wereld.

Het principe van tomografie is het achterhalen van de inwendige structuur van objecten door de resultaten van de interactie van een veld of signaal dat door het object heengaat te interpreteren. In de medische toepassingen (zie bijvoorbeeld Bibb en Winder, 2011) wordt gebruik gemaakt van elektromagnetische velden (gamma- of röntgenstraling) – ook bij KWR is hier ervaring mee opgedaan (met zichtbaar licht, zie o.a. Van Thienen et al., 2011 en Van Thienen en Floris, 2012). Hierbij wordt van buitenaf (bijvoorbeeld door een röntgenbron) of van binnenuit (door verval van ingebrachte radioactieve elementen) door het object heen geschoten, waarbij het object interacteert met het veld (absorptie, verstrooiing, breking, etc.). Deze interactie is vaak een functie van de locatie binnen het object; zo absorbeert en/of verstrooit botweefsel meer fotonen dan vetweefsel. Buiten het object wordt het veld op een aantal locaties gemeten. Met kennis van de fysica van deze interacties kan met behulp van zogenaamde wiskundige inversiemethodieken een beeld van deze interne interacties worden verkregen en daarmee een beeld van de inwendige structuren waar deze interacties mee samenhangen. Een illustratie hiervan is weergegeven in Figuur 1.



*Figuur 1: Test van de bij KWR ontwikkelde optische tomograaf voor de studie van gesuspendeerde deeltjes in stromend water. De optische tomograaf is een ring van lichtbronnen en -sensoren die om een transparante buis heen is gemonteerd (b,d). De test bestaat uit de reconstructie van semi-lichtdoorlatende objecten (gaasgordijnen: a,c) die in de buis binnen deze ring worden aangebracht. De positie en oriëntatie van deze gordijnen (zwarte stippellijnen in e-g), weergegeven in een doorsnede door de buis en ring heen, wordt in redelijke mate correct gereconstrueerd (rode zones in e-g). Overgenomen uit Van Thienen et al. (2011).*

## 2.2 Beoogde toepassing

Voor het huidige project wordt niet gedacht aan elektromagnetische velden maar aan elastische golven die als signaal de te inspecteren objecten, leidingen, doorlopen. Op deze wijze worden door seismologen aardbevingsgolven gebruikt om de structuur van het inwendige van de Aarde te achterhalen (zie bijvoorbeeld Bijwaard en Spakman, 1999). De voortplanting en interactie van deze golven (ook wel bekendstaand als (ultra)geluid) in een leiding is een functie van verschillende materiaaleigenschappen en de geometrie. Leidingmateriaal dat is aangetast (bijvoorbeeld uitgeloozd asbestcement of verroest gietijzer) heeft andere voortplantingseigenschappen van elastische golven dan onaangetast materiaal. Ook resulteren (ongewenste) veranderingen van de geometrie, zoals bijvoorbeeld scheuren of gaten, in andere interacties van (ultra)geluid met de buis. Het idee is om deze veranderingen te reconstrueren uit opgevangen signalen van in de lengterichting door de buis gestuurde (ultra)geluidsgolven. Dit rapport beschrijft in hoeverre dit idee (in principe) realiseerbaar is en wat daarbij de mogelijke problemen en beperkingen zijn.

## 2.3 Basisconfiguratie

Er wordt uitgegaan van de volgende, in de olie-industrie gangbare benadering: elastische golven worden over een bepaalde afstand in één richting door een leiding(segment) gestuurd om dit te bemonsteren. Hiertoe worden aan het ene uiteinde van het segment rondom de buis trillingsbronnen aangebracht. Aan het andere uiteinde van het segment worden meerdere ontvangers geplaatst. De exacte configuratie van deze ontvangers is op dit moment niet relevant. Samengevat is het uitgangspunt dus twee punten waarop toegang tot de leiding noodzakelijk is.

## 3 Voortplanting van geluid in begraven leidingen

### 3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de belangrijkste mechanismen en begrippen. Aangezien het een zeer specialistisch onderwerp betreft, waarvoor KWR de benodigde expertise niet in huis heeft, is de beschrijving enigszins oppervlakkig, en bovendien incompleet omdat deze sterk gericht is op de beoogde toepassing. Het doel is om voldoende context te beschrijven voor de beschouwing van de volgende hoofdstukken.

### 3.2 Golftypes

Elastische golven in vaste stoffen kunnen zowel longitudinaal (bewegingsrichting van deeltjes is dezelfde als de bewegingsrichting van de golf) als transversaal (bewegingsrichting van deeltjes staat loodrecht op die van de golf) zijn.

Geleide golven (*guided waves*) zijn golven die geleid worden door de grenzen van het medium waarin zij zich voortplanten. In het geval van een buis zijn dit de binnen- en buitenkant van de wand. Zogenaamde Lambgolven zijn ultrasone elastische geleide golven in oneindige platen (Leonard en Hinders, 2005). In de praktijk heeft men vanzelfsprekend te maken met eindige platen, die bovendien in het voor in dit rapport relevante geval zijn omgevouwen tot buizen. In dit geval wordt vaak gesproken van geleide Lambgolven. Deze zijn in feite opgebouwd uit een combinatie van transversale en longitudinale golven die tussen de twee grensvlakken van de plaat of buiswand heen en weer worden gereflecteerd (zie Luangvilai, 2007).

Deze geleide Lambgolven zijn bij uitstek geschikt voor het bemonsteren van buizen, omdat (in principe) vrijwel alle energie zich voortplant in de richting van de buis. Hierdoor is een grotere afstand te overbruggen dan wanneer het signaal alle kanten op zou gaan.

Bij geleide golven in een buis worden symmetrische en asymmetrische gevallen onderscheiden. In het symmetrische geval bewegen de binnen- en buitenwand gelijktijdig van het centrum van de wand af en naar de wand toe – er treedt dus rek op. In het asymmetrische geval bewegen binnenwand en buitenwand gelijktijdig naar binnen en naar buiten – er treedt dus buiging (*flexuur*) van de buiswand op.

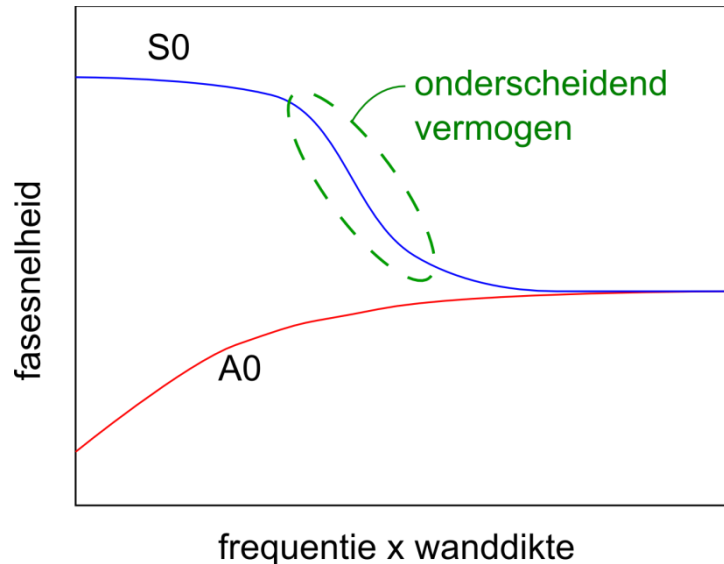
### 3.3 Golfmodes

Geleide golven worden doorgaans gemarkeerd door de letter S voor symmetrische modes en de letter A voor asymmetrische modes, gevolgd door een getal dat de orde van de golf aangeeft. Voor ordes groter dan 0 geldt dat deze gerelateerd zijn aan resonanties van het object en alleen bestaan boven de betreffende resonantiefrequentie. De fundamentele modes (orde 0) bestaan voor alle frequenties (zie Luangvilai, 2007).

### 3.4 Dispersiecurves

Dispersiecurves zijn diagrammen die de fasesnelheid voor verschillende golfmodes weergeven als functie van de frequentie of van het product van de frequentie en de wanddikte. De fasesnelheid is de voortplantingssnelheid van een individuele golfcomponent in het totale golfveld. Een voorbeeld van dispersiecurves is weergegeven in Figuur 2. In dit

voorbeeld is voor mode S0 een bereik van frequentie x wanddikte te vinden waarvoor een kleine variatie resulteert in een aanzienlijke verandering van de fasesnelheid. In dit bereik zullen dus aanzienlijke variaties in de aankomsttijd optreden, die gebruikt kunnen worden voor een tomografische reconstructie. Buiten dit bereik zullen weinig variaties in aankomsttijd optreden, waardoor er geen bruikbaar tomogram op basis van aankomsttijden kan worden gemaakt.



Figuur 2: Dispersiecurves voor twee golfmodes S0 en A0. Wanneer de fasesnelheid weinig varieert als functie van de wanddikte, zullen er weinig verschillen optreden in reistijd tussen golven die door aangetaste (kleinere effectieve wanddikte) en onaantaste buisdelen lopen, zodat de eerstgenoemde niet kunnen worden gereconstrueerd. Bij keuze van de juiste golfmode en frequentie is de benodigde onderscheidendheid soms wel te realiseren.

### 3.5 Damping

Elastische golven en dus ook Lambgolven vertonen een afname van amplitude naarmate zij verder reizen. Dit wordt damping (*attenuation*) genoemd en is het gevolg van twee processen (Long et al., 2003a, Luangvilai, 2007): absorptie door het medium en lekkage (*leakage*) naar de omgeving. Damping treedt op in visceuze of visco-elastische materialen, zoals plastics, gecementeerde materialen en composieten. In sommige materialen, zoals bijvoorbeeld staal, is damping verwaarloosbaar. Leekage treedt op in een systeem dat niet volledig gesloten is, oftewel er is een mechanische koppeling met de omgeving. Op het grensvlak wordt een deel van de elementaire transversale en longitudinale golven gereflecteerd (waarbij ze deel blijven uitmaken van de Lambgolf) en een deel wordt doorgegeven aan de omgeving, waarbij de energie weglekt uit het systeem. Het ligt voor de hand dat dit bij begraven leidingen een groter probleem vormt dan bij vrij liggende leidingen.

### 3.6 Gebruik van voortplantingseigenschappen voor tomografische reconstructies

Er zijn meerdere voortplantingseigenschappen op basis waarvan in principe een tomografische reconstructie zou kunnen worden gemaakt. Een eerste is de damping. Wanneer deze een functie is van materiaaldegradatie of effectieve wanddikte, zullen golven die door aangetaste gebieden zijn gelopen met een andere amplitude aankomen bij de ontvangers dan golven die niet door aangetaste gebieden zijn gereisd. De amplitudes van de aankomende golven zijn hierbij dus de metingen die moeten worden geïnverteerd tot een tomogram.

Een tweede voortplantingseigenschap is de zogenaamde dispersie, ofwel de afhankelijkheid van de voortplantingssnelheid van de frequentie. Deze kan het gevolg zijn van hetzij geometrische variaties (wanddikte) in het geval van *geleide golven (guided waves)*, hetzij materiaalvariaties. Wanneer een buis door materiaal of geometrie dispersief is, zullen golven die door aangetaste gebieden zijn gelopen een andere aankomsttijd hebben dan wanneer de betreffende gebieden niet zouden zijn aangetast.

Ook vanuit het oogpunt van signaalverwerking zijn er redenen om voor een bepaalde benadering te kiezen. De golven die het eerst bij een ontvanger aankomen, zijn goed te herkennen, maar de daarna aankomende golven lopen vaak door elkaar heen, waardoor individuele fasen moeilijker herkenbaar zijn. Een inversie van aankomsttijden van de eerste golven is ook minder complex dan een inversie van het volledige golfveld. Aangezien aankomsttijden nauwkeuriger en betrouwbaarder te bepalen zijn dan amplitudes (zie Bijlage I), wordt vaak, in ieder geval in eerste instantie, gekozen voor inversie van de eerste aankomsttijden. Deze benadering vereist echter wel dat het medium, in ons geval de buis, dispersief is onder relevante omstandigheden.

## 4 Bestaande uitwerkingen en implementaties

### 4.1 Wetenschappelijke literatuur

Het gebruik van tomografische technieken voor het opsporen van afwijkingen in buiswanden is reeds door verschillende mensen onderzocht en in de academische literatuur gepubliceerd. Een overzicht van gepubliceerde benaderingen en hun karakteristieken is weergegeven in Tabel 2. Al deze publicaties beschrijven min of meer succesvolle tomografische reconstructies van aanwezige (vaak door de onderzoekers zelf aangebrachte) afwijkingen en defecten. Er zijn enkele opvallende gemene delers. De eerste is het materiaal, namelijk staal of aluminium. De tweede betreft de afmetingen van de te inspecteren objecten, welke meestal kleiner dan 1 meter en maximaal 8 meter groot zijn. Een verdere overeenkomst is niet expliciet in de tabel aangegeven, maar wordt hier nog even genoemd: in alle gevallen zijn de buizen omgeven door lucht. Er zijn wel enkele studies gepubliceerd over de voortplanting en demping van elastische golven in begraven leidingen (Long et al., 2003a, Long et al., 2003b, Long et al., 2004), maar in deze werken wordt geen tomografische reconstructie gemaakt.

### 4.2 Praktijktoepassingen

Een zoektocht op het web heeft slechts één commercieel aangeboden dienst van tomografische inspecties van leidingen opgeleverd. Het bedrijf Corrosion Inspection Technologies (<http://www.cit-corrosion-group.com/technology.html>) biedt ultrasone tomografie van stalen leidingen op basis van TNO-technologie.

Tabel 2: Chronologisch overzicht van in de wetenschappelijke literatuur gepubliceerde onderzoeken en toepassingen van tomografische conditiebepaling van platen en buizen. Gebruikte afkortingen: sim: simulatie; exp: experiment, alu: aluminium.

Referenties	Beschrijving	sim/ exp	mat.	afmetingen	beoogd toepassing s-veld	opmerkingen
McKeon en Hinders (1999)	Introductie van de tomografische methode voor de reconstructie van schade in dunne materialen.	exp	alu	10x10 cm	vliegtuigen , opslagtank s, drukvaten	
Malyarenko en Hinders (2001)	De auteurs beschrijven een verbeterde methode voor tomografische reconstructies op basis van verstrooiing van Lambgolven.	exp	alu	20x20 cm		plaat, geen buis
Hinders et al. (2002)	Een aantal dubbelblinde tests van de tomografische reconstructiemethode van deze auteurs wordt gepresenteerd.	exp	alu	20x20 cm	vliegtuigen , opslagtank s, drukvaten	
Leonard en Hinders (2003, 2005)	Met behulp van ultrasone Lambgolven worden lokale verdunningen in buiswanden gereconstrueerd. Er worden twee benaderingen ontwikkeld, met elk een andere configuratie van de ontvangers, waarvan er één relevant is voor buizen: <i>helical ultrasound tomography</i> (HUT).	sim, exp	staal , alu	47x47 cm, 18-32 cm (l) bij 10-17.5 cm (diameter)	buizen	resp. plaat en buis
Belanger en Cawley (2009)	Aangetoond wordt dat reistijd tomografie met laagfrequente Lambgolven (50/175 kHz) vanwege beperkingen van de golftheorie niet gebruikte kunnen worden voor het bepalen van de diepte van defecten in een plaat. Gebruik van hogere frequenties leidt tot	sim, exp	staal , alu	160x50x1 cm, 120x120x1 cm	petro- chemische installaties	



	meer verstrooiing door gecorrodeerde oppervlakken, waardoor bereikbare afstanden korter worden. De complexere diffractietomografiemethoden (zie Malyarenko en Hinders, 2001) biedt perspectief, maar vergt wel een geschikte methode voor de scheiding van het verstrooide veld van het totale golfveld.					
Zhang et al. (2011)	Deze auteurs <u>modelleren</u> een buis met en zonder een scheur aan een van de uiteinden, en simuleren de voortplanting van golven door deze objecten. Vervolgens wordt de locatie van de afwijking gereconstrueerd met tomografische technieken. Ook in deze ideale opstelling (zonder vulling of omhulling) en op deze beperkte schaal maken zij reeds gebruik van beeldsamenvoegtechnieken om op basis van meerdere reconstructies met een deel van de dataset tot een redelijk duidelijk en ruisvrij beeld te komen.	sim	staal	20 cm	buizen	
Leckey et al. (2012)	De zogenaamde driedimensionale elastodynamische eindige integratietechniek is toegepast om verstrooiing van Lambgolven door twee typen mankementen te berekenen. Zij tonen aan dat deze geavanceerde benadering nodig is om tot een correcte dieptebeoordeling van het mankement te komen.	sim, exp	alu		vliegtuigen	gericht op typische mankementen in vliegtuigaluminium
Willey et al. (2014)	Door ook gebruik te maken van helische golven die tussen zender en ontvanger meerdere malen de buis omcirkelen, weten deze auteurs de resolutie van tomogrammen en de nauwkeurigheid van corrosie-/erosiediepte te verbeteren.		staal	65 cm (l) bij 22 cm (diameter), 51 cm (l) bij 22 cm (diameter)	olie- en gasbuizen	
Van Zon en Volker (2014)	Deze auteurs hebben enkele verbeteringen in de dataverwerking en tomografische reconstructie doorgevoerd die leiden tot een vergroting van het bereik van de methode, zowel wat betreft maximaal toelaatbare wanddikte als wat betreft de afstand tussen de bronring en de ontvangerring tot circa 8 meter.	?	staal	8 meter (l) bij 25 cm (diameter)	oliebuizen	

## 5 Verwachtingen m.b.t. toepasbaarheid op begraven drinkwaterleidingen

### 5.1 Inleiding

Mede naar aanleiding van het in Bijlage I beschreven gesprek wordt specifiek de toepasbaarheid van tomografie op basis van aankomsttijden in een dispersieve situatie beschouwd. Dit vereist dat het medium dispersief is in een bruikbaar bereik van frequentie  $\times$  wanddikte. Hieronder worden dispersiecurves voor relevante materialen beschouwd. Om in te schatten over welk bereik een dergelijke methodiek bruikbaar zou kunnen zijn, wordt vervolgens ook de demping van elastische golven in de betreffende materialen beschouwd. Om het daadwerkelijke bereik in te schatten, is tevens de verhouding tussen het vermogen van trillingsbronnen en de gevoeligheid van sensoren van belang. Deze verhouding mag in de praktijk maximaal van de orde van 23 dB zijn, voordat het signaal onbruikbaar wordt (Tim van Zon, persoonlijke communicatie). Dit getal komt voort uit:

- de eis dat de signaal-ruisverhouding beter moet zijn dan 26 dB voor een nauwkeurige bepaling van aankomsttijden;
- de signaal-ruisverhouding bij de trillingsbron ongeveer 20 dB is voor een enkele bepaling;
- deze verhouding door herhaalde metingen te verbeteren is tot bijvoorbeeld 49 dB bij 1000 metingen. Bij een vereiste signaal-ruisverhouding van 26 dB mag er onderweg dus 23 dB verloren gaan.

Ook is de omvang van de te detecteren variaties in wanddikte of defecten van belang.

### 5.2 Dispersiecurves

Dispersiecurves zijn een functie van materiaal en geometrie, en als zodanig moeilijk generiek weer te geven. Er bestaat specialistische software voor het berekenen van dispersiecurves in diverse geometrieën: *Disperse* (Lowe en Pavlakovic, 2013a). Hiermee kan de voortplanting, dispersie, lekkage en demping van ultrasone golven in het systeem water-buis-omringende grond worden voorspeld voor willekeurige materialen, buisdiameters en wanddiktes. Hiermee zou het mogelijk zijn om per leidingcohort de mogelijkheden en grenzen van ultrasone reistijd-tomografische conditiebepaling vast te stellen. Vanwege de hoge licentiekosten bleek dit echter niet haalbaar binnen het huidige project en beperken we ons hier tot de constatering dat voor stalen buizen de S0-mode dispersief is onder relevante condities (zie bijlage I), min of meer zoals geïllustreerd in Figuur 2.

### 5.3 Bereik

Zoals beschreven in het vorige hoofdstuk neemt de amplitude van een elastisch golf af door demping en lekkage. Deze processen, die hieronder worden uitgewerkt, bepalen in feite in grote mate over welke afstand een opgewekte golf nog gemeten kan worden, zodat er een tomografische reconstructie op kan worden gebaseerd. Hiernaast geldt ook nog dat, om voldoende resolutie te verkrijgen, er voldoende kruisende golfpaden moeten zijn in het te bestuderen leidingsegment. Dit vereist dat de zogenaamde openingshoek, de hoek waarin elastische golven kunnen worden weggezonden door de trillingsbron, voldoende groot is. Voor huidige toepassingen op olieleidingen zijn hiervoor geen technische beperkingen (zie bijlage I).

### 5.3.1 Damping door lekkage en verstrooiing

Voor niet-ingegraven buizen geldt dat door een trilling rondom de buis aan te brengen (met behulp van bijvoorbeeld een ring van trillingsbronnen) axiaal-symmetrische modes (eigen trillingen) kunnen worden aangeslagen die een groot bereik in de lengterichting van de buis hebben (Hinders en Leonard, 2005). Wanneer leidingen echter begraven zijn, lekt potentieel veel energie weg naar de ondergrond, zodat het signaal mogelijk over relatief korte afstand nagenoeg verdwijnt.

De voorplanting van (ultra)geluid in begraven leidingen is onderzocht door Long et al. (2003), gebruik makend van de hierboven genoemde software *Disperse*. Zij komen tot een aantal relevante bevindingen met betrekking tot de damping van een golf door lekkage: als de fasesnelheid van een betreffende golfmode kleiner is dan de bulksnelheden in het omringende medium, treedt er geen lekkage op. Voor transversale golven is dit voor alle praktisch relevante situaties het geval. Voor longitudinale golven hangt dit af van de bodemkarakteristieken. Voor een waterverzadigde, kleiige bodem worden voor de fundamentele symmetrische (axiale verplaatsing) en axisymmetrische (radiale verplaatsing) modes dempingsfactoren door lekkage gevonden variërend van minder dan 10 tot circa 60 dB.mm/m in het frequentie-wanddiktebereik van 0 tot 1.2 MHz.mm. Deze getallen zijn uitgedrukt als product van de damping (in dB/m) en de wanddikte (in mm). Een damping van 40 dB.mm/m bij een wanddikte van 4 mm komt dus neer op een damping van 10 dB/m. De genoemde variaties zijn een functie van de golfvoortplantingssnelheid van transversale golven in de bodem en aanwezige resonanties. Voor een wateronverzadigde, korrelige bodem (bijvoorbeeld zand) worden in het genoemde frequentie-wanddiktebereik veel hogere dempingsfactoren door lekkage gevonden, variërend van 20 dB.mm/m tot meer dan 1000 dB.mm/m, opnieuw afhankelijk van aanwezig resonanties en nu van de golfvoortplantingssnelheid van longitudinale golven in de bodem. Long et al. (2003) voorspellen en stellen experimenteel vast dat het bereik van de zogenaamde  $\alpha$ -mode (axiale verplaatsing in de waterfase) een veel groter bereik heeft. Deze is echter niet relevant voor tomografische inspectie van de buiswand, aangezien deze niet door de buiswand reist.

Bovenop de beschreven damping door lekkage voorspellen Long et al. (2003) ook een significant verlies van signaalsterkte ten gevolge van verstrooiing bij verbindingen en appendages.

### 5.3.2 Damping door absorptie

Voor asbestcement blijken in de literatuur geen waarden voor de damping door absorptie te vinden. Voor andere cementgebonden materialen wel; deze worden als representatief verondersteld, aangezien voor verschillende fracties en korrelgroottes van vulmateriaal dempingen van dezelfde orde grootte worden gevonden. Philippidis en Aggelis (2005) presenteren resultaten van een experimentele studie naar de dispersie en damping van (ultrasone) longitudinale elastische golven in uitgehard cement en beton met verschillende fracties korrelmateriaal en water. Voor een uitgeharde cementpasta (zonder zand, wisselende waterfracties) vinden zij bij 100 kHz een damping van 50-70 dB/m en bij hogere frequenties tussen de 10 en 30 dB/m. Voor cement (met zand) en beton, beide met een aggregaat/cementverhouding van 3 en wisselende waterfracties, bepalen zij bij 100 kHz een **damping van circa 20 dB/m, oplopend tot zo'n 30-40 dB/m** bij hogere frequenties. Met deze getallen wordt in het gunstigste geval (10 dB/m) over een afstand van 1 meter de golfenergie met een factor 10 verminderd.

Damping in gietijzer (zowel lamellair als nodulair) is minimaal in het relevante frequentiebereik (Gao et al., 2001). Numerieke waarden blijken echter moeilijk te vinden. Voor PVC is deze van de orde van 200 dB/m/MHz (bijvoorbeeld 20 dB/m bij een frequentie

van 100 kHz; Demčenko et al., 2012), oftewel van dezelfde orde grootte als voor cementgebonden materiaal. Lowe en Pavlakovic (2013b) geven voor de demping van staal een waarde van  $0.003 Np/\lambda$  (Neper per golflengte). Voor een golflengte van 1 cm (zie paragraaf 5.4) komt dit neer op circa 3 dB/m.

### 5.3.3 Samenvatting

Tabel 3 geeft een overzicht van demping door lekkage van golfenergie naar de bodem en door absorptie door het leidingmateriaal. Uitgaande van het hierboven genoemde maximale signaalverlies van 23 dB, is de maximaal te overbruggen afstand voor de in de tabel genoemde waarden van de orde van 10 cm tot 8 m in het geval de leiding niet begraven is. Dit vormt een bevestiging van een vergelijkbare constatering in bijlage I. Voor begraven leidingen is deze afstand nog kleiner. Zo is, wanneer men uitgaat van demping door lekkage van 10 dB/m, is de maximale afstand voor een begraven stalen leiding minder dan 2 meter.

Tabel 3: Overzicht van dempingsfactoren voor verschillende mechanismen en materialen.

materiaal	demping door lekkage	demping door absorptie	maximale afstand niet begraven (m)
Gietijzer	orde 1-100 dB/m	minimaal	groot
AC	vergelijkbaar?	20-40 dB/m	0,6-1
PVC	vergelijkbaar?	orde 200 dB/m	0,1
staal	vergelijkbaar?	orde 3 dB/m	8

### 5.4 Omvang van variaties in wanddikte en defecten

Kleine variaties in de effectieve wanddikte kunnen grote veranderingen in de fasesnelheid van een golf tot gevolg hebben. Hierdoor zijn deze in principe goed te reconstrueren met behulp van tomografische technieken. Zo komen Van Zon en Volker (2013) tot een nauwkeurige bepaling van een afname van de wanddikte van 30% in een buis van 8 meter lang met een wanddikte van 24 mm. Wanneer de wanddiktevariaties echter onregelmatig zijn, kunnen zij een dermate complex golfpatroon veroorzaken dat reconstructie moeilijk is. Voor geleidelijke variaties wordt dit probleem niet verwacht (zie bijlage I).

Voor lokale defecten (bijvoorbeeld corrosieputten in gietijzer) geldt dat zij niet of nauwelijks effect hebben op de golfvoortplanting als zij te klein zijn (zie bijlage I). Hierbij is de verhouding tot de golflengte van belang; wanneer de defecten kleiner zijn, zijn zij naar verwachting niet waarneembaar. Een overzicht van golflengtes van transversale en longitudinale golven is bij relevante frequenties is weergegeven in Tabel 4. De waarden liggen tussen de 1 mm en 6 cm. Overigens melden Belanger en Cawley (2009) dat defecten die kleiner zijn dan de golflengte met behulp van diffractietomografie toch kunnen worden gereconstrueerd. Die benadering kent echter zijn eigen uitdagingen en beperkingen.

### 5.5 Samenvattend: slagingskans tomografische inspecties

Op basis van het bovenstaande lijkt de grootste hindernis voor toepassing van ultrasone tomografie op begraven leidingen de demping van de golf te zijn, die met enkele meters de golfenergie met een factor 1000 of meer kan doen afnemen. Voor PVC en AC komt deze voort uit de absorptie door visco-elastische materiaalcomponenten. Voor alle materialen vindt er bovendien een aanzienlijk lekkage van golfenergie naar de ondergrond plaats.

Tabel 4: Overzicht van typische golflengtes bij relevante frequenties.

	materiaal	voortplantings- snelheid (m/s)	Frequentie ultrasone golven		
			100 kHz	500 kHz	1 MHz
longitudinaal	gietijzer	3500-5800	3,5-5,8	0,7-1,2	0,4-0,6
	ijzer (staal)	5960	6,0	1,2	0,6
	beton	3900-4700	3,9-4,7	0,8-0,9	0,4-0,5
	PVC	2395	2,4	0,5	0,2
transversaal	gietijzer	2200-3200	2,2-3,2	0,4-0,6	0,2-0,3
	ijzer (staal)	3260	3,3	0,7	0,3
	beton	2300	2,3	0,5	0,2
	PVC	1060	1,1	0,2	0,1

Er zijn geen dispersiecurves voor de relevante systemen (water-buismateriaal-bodem) berekend. Er is dus ook niet vastgesteld of het systeem voldoende dispersief is om reconstructies van variaties in effectieve wanddikte met behulp van reistijd tomografie mogelijk te maken. Voor vrijliggende stalen leidingen is bekend dat de S<sub>0</sub>-mode dispersief is in een relevant frequentie-wanddiktebereik; hier wordt gebruik van gemaakt bij tomografische inspecties van olieleidingen.

Bestaande technieken kunnen in vrijliggende stalen buizen wanddiktevariaties relatief nauwkeurig vaststellen. De verwachting is echter dat dit alleen goed werkt bij geleidelijke variaties. Wanneer er veel lokale diktevariaties bestaan, wordt het golfveld moeilijker te interpreteren. Om putcorrosie in gietijzer te kunnen reconstrueren is naar verwachting gebruik van de meer geavanceerde diffractietomografie nodig.

Het bovenstaande is gebaseerd op een grove inventarisatie met veel onzekerheden. Vooralsnog bieden de bevindingen echter geen aanleiding tot directe verdere studie en/of ontwikkeling van ultrasone tomografische inspectietechnieken voor begraven leidingen.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

### 6.1 Conclusies

De toepasbaarheid van tomografische conditiebepaling op basis van geleide Lambgolven in begraven leidingen is ingeschat voor verschillende materialen. Op basis van de materiaalafhankelijke demping lijkt de methode het best toepasbaar bij vrijliggende stalen en gietijzeren leidingen over korte afstanden (< 10 m). In Australië bestaan lange bovengrondse transportleidingen die waarschijnlijk van staal zijn gemaakt. Hier zou toepassing voor het detecteren van defecten mogelijk interessant kunnen zijn.

Lekkage van golfenergie naar de ondergrond in het geval van begraven leidingen kort deze maximale afstand nog verder in. Hiermee wordt toepassing van deze methode niet minder ingrijpend dan die van andere in paragraaf 1.1 genoemde niet-destructieve inspectiemethoden, en ligt verdere studie naar en/of ontwikkeling van de methodiek niet voor de hand.

### 6.2 Aanbevelingen

Aangezien de toepassing van tomografische conditiebepaling op begraven drinkwaterleidingen op dit moment weinig kansrijk lijkt, wordt aanbevolen nu geen energie te steken in ontwikkeling van methoden op dit gebied specifiek gericht op drinkwatermaterialen. Het kan echter interessant zijn om de methodiek zoals deze reeds door TNO wordt toegepast op stalen leidingen een keer in het veld te beproeven op een stalen of gietijzeren leiding, voordat deze wordt uitgenomen voor destructieve conditiebepaling. Zo kan worden vastgesteld of de tomografische methode bruikbaar is voor het bepalen van de noodzaak van uitname van leidingsegmenten.

De ontwikkelingen staan echter niet stil (Rose, 2011). Het is denkbaar dat daar meer geavanceerde technieken zullen worden ontwikkeld, die de toepasbaarheid op drinkwaterleidingen mogelijk vergroten. Daarom wordt aanbevolen de ontwikkelingen op het gebied van tomografische conditiebepaling, met name diffractietomografie, buiten de watersector te blijven volgen.

## 7 Referenties

- Arsénio, A. (2013) Lifetime prediction of PVC push-fit joints. Proefschrift, TU Delft.
- Belanger, P. en P. Cawley (2009) *Feasibility of low frequency straight-ray guided wave tomography*. NDT&E International, 42, pp. 113-119.
- Beuken, R.H.S., E.P. Postmus, H. de Kater en G.A.M. Mesman (2011) *In-line inspection techniques for water mains put into perspective*. LESAM 2011.
- Beuken, R., P. Horst, G. Mesman en R. van Eijk (2013) *Akoestische metingen brengen de leidingconditie in beeld*. H<sub>2</sub>O online.
- Bibb, R. and Winder, J. (2010) *A review of the issues surrounding threedimensional computed tomography for medical modelling using rapid prototyping techniques*, Radiography, 16, 78-83.
- Bijwaard, H. and Spakman, W. (1999) *Tomographic evidence for a narrow whole mantle plume below Iceland*, Earth Planet. Sc. Lett., 266, 121-126.
- Demčenko, A., R. Akkerman, P.B. Nagy en R. Loendersloot (2012) Non-collinear wave mixing for non-linear ultrasonic detection of physical ageing in PVC. NDT&E International, 49, pp. 34-39.
- Edwards, G. R. (2007) *Detection of corrosion in offshore risers using guided ultrasonic waves*. 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2007.
- Gao, W., C. Glorieux, S.E. Kruger, K. Van de Rostyne, V. Gusev, W. Lauriks en J. Thoen (2001) *Investigation of the microstructure of cast iron by laser ultrasonic surface wave spectroscopy*. Materials Science and Engineering, A313, pp. 170-179.
- Graff, K.F. (1975) *Wave motion in elastic solids*.
- Hinders, M.K., K.R. Leonard en E.V. Malyarenko (2002) *Blind test of Lamb wave diffraction tomography*. AIP Conf. Proc. 615, 278
- Hinders, M. K. en K.R. Leonard (2005) Lamb Wave Tomography of Pipes and Tanks Using Frequency Compounding. Review of Quantitative Evaluation, vol. 24, pp. 867-874.
- De Kater, H. R. Beuken en A. Vogelaar (2010) *Inspectietechnieken voor rationeel saneringsbeleid van leidingen. Een overzicht van technieken en randvoorwaarden*. BTO 2010.013.
- Kondis, A. (2005) *Acoustical wave propagation in buried water filled pipes*. Afstudeerscriptie, MIT.

Leckey, C.A.C., M.D. Rogge, C.A. Miller en M.K. Hinders (2012) *Multiple-mode Lamb wave scattering simulations using 3D elastodynamic finite integration technique*. *Ultrasonics*, 52, pp. 193-207.

Leonard, K.R. en Hinders, M. K. (2003) Guided wave helical ultrasonic tomography of pipes. *J. Acoust. Soc. Am.*, 114(2), pp. 767-774.

Leonard, K.R. en Hinders, M.K. (2005) *Lamb wave tomography of pipe-like structures*. *Ultrasonics* 43, pp. 574-583.

Long, R., M. Lowe en P. Cawley (2003a) *Attenuation characteristics of the fundamental modes that propagate in buried iron water pipes*. *Ultrasonics*, 41, pp. 509-519.

Long, R., P. Cawley en M. Lowe (2003b) *Acoustic wave propagation in buried iron water pipes*. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 495, doi: 10.1098/rspa.2003.1148.

Long, R., T. Vogt, M. Lowe en P. Cawley (2004) *Measurement of acoustic properties of near-surface soils using an ultrasonic wave guide*. *Geophysics*, 69(2), pp. 460-465, doi: 10.1190/1.1707065.

Lowe, M. en B. Pavlakovic (2013a) *Disperse*. <http://www3.imperial.ac.uk/nde/products%20and%20services/disperse>, bezocht op 13 mei 2014.

Lowe, M. en B. Pavlakovic (2013b) *Disperse User's Manual*. Non-Destructive Testing Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Imperial College London.

Luangvilai, K. (2007) *Attenuation of Ultrasonic Lamb Waves with Applications to Material Characterization and Condition Monitoring*. Proefschrift, Georgia Institute of Technology.

Malyarenko, E.V. en M.K. Hinders (2001) *Ultrasonic Lamb wave diffraction tomography*. *Ultrasonics*, 39, pp. 269-281.

Marlow, D., S. Heart, S. Burn, A. Urquhart, S. Gould, M. Anderson, S. Cook, M. Ambrose, B. Madin, A. Fitzgerald (2007) *Condition assessment strategies and protocols for water and wastewater utility assets*. WERF / Awwa Research Foundation.

McKeon, J.C.P. en M.K. Hinders (1999) *Parallel projection and crosshole Lamb wave contact scanning tomography*. *J. Acoust. Soc. Am.* 106, 2568

Mesman, G.A.M. en P.G.G. Slaats (2003) *Conditiebepaling asbestcement waterleidingen*. KIWA Nieuwegein, BTO 2003.038

Mesman, G.A.M. (2010) *Inventarisatie historische SI Brabant Water*, BTO 2010.081.

Philippidis, T.P. en D.G. Aggelis (2005) *Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete*. *Ultrasonics*, 43, pp. 584-595.

Rose, J.L. (2011) *The upcoming revolution in ultrasonic guided waves*. *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2011*, edited by H. Felix Wu, Proc. of SPIE Vol. 7983



Van Thienen, P., R. Floris en S. Meijering (2011) *Application of optical tomography in the study of discolouration in drinking water distribution systems*. Drinking Water Engineering and Science, 4, 61-69.

Van Thienen, P. en R. Floris (2012) *Optical tomography for drinking water discolouration research*. BTO 2012.240(s).

Vonk, E. (2014) *Het voorspellen van inwendige uitloging van asbestcementleidingen met een kunstmatig neurale netwerk*. BTO 2014.211(s).

Wetsus (2014) *MATERIAL CHARACTERISATION OF WATER PIPE SYSTEMS USING ULTRASONICS*. <http://www.utwente.nl/ctw/tm/research/projects/Wetsus/>, benaderd op 26 mei 2014.

Willey, C.L., F. Simonetti, P.B. Nagy en G. Instones (2014) *Guided wave tomography of pipes with high-order helical modes*. NDT&E International, 65, pp. 8-21.

Zhang, H., J. Yu en X. Chen (2011) *Guided Waves Tomography and Image Fusion for Damage Identification in Pipes*. Applied Mechanics and Materials, 94-96, pp. 1585-1589.

Van Zon, T. en A. Volker (2013) *Recent developments in guided wave travel time tomography*. AIP Conference Proceedings; Jan 2013, Vol. 1511 Issue 1

## Bijlage I: Gespreksverslag Tim van Zon en Paul van Neer (TNO)

Gespreksdeelnemer	instituut	expertise
Tim van Zon	TNO	tomografie, inversiemethodieken
Paul van Neer	TNO	sensoren, hardware voor o.a. akoestische/ultrasone methoden
Peter van Thienen	KWR	drinkwaterdistributie, numerieke modellen

Plaats: TNO, Delft

Datum: 22 april 2014

Na wederzijdse introducties schetst PvT de informatiebehoefte van KWR in het kader van het **verkennend onderzoek "CT-scan voor begraven leidingen": in hoeverre zijn tomografische technieken op basis van akoestische/ultrasone geschikt voor *in situ* conditiebepaling van begraven drinkwaterleidingen?**

TvZ en PvN schetsen twee veel toegepaste benaderingen:

1. In het geval van een dikke buiswand wordt vaak gewerkt met een enkele trillingsbron en een enkele ontvanger/sensor, die achtereenvolgens op verschillende plaatsen op de buis wordt gemonteerd.
2. In het geval van een dunne buiswand wordt gewerkt met zogenaamde *guided waves*, met een bronfrequentie van circa 100 kHz.

PvT schetst een beeld van gebruikte materialen, geometrieën en toepassingen in drinkwaterdistributiesystemen. Op basis van dit beeld komen TvZ en PvN met de volgende observaties:

- Cement heeft een sterk dempende werking op de gebruikte golven, mogelijk in de orde van 20-100 dB/m.
- Verbindingen vormen een potentieel probleem (voortplanting, reflecties) - losse segmenten maken het beeld veel rommeliger.
- Meestal worden de ontvangers slechts aan een zijde van de bron geplaatst, omdat dit een duidelijker een beter te interpreteren beeld oplevert.
- De karakteristieke golvende aangroeiingen aan de binnenzijde van ongecoate gietijzeren buizen maken tomografische inspectie van deze leidingen vermoedelijk onmogelijk.
- Voor AC wordt de verwachting uitgesproken dat indien de uitlogingsdiepte veel varieert op korte lengteschaal, ook hier de succesvolle toepassing van tomografische technieken moeilijk zal zijn. Indien de variaties geleidelijker zijn (uniforme uitlogging), wordt succesvolle toepasbaarheid waarschijnlijker.
- Bij PVC treedt mogelijk een verandering van de waarde van elastische parameters op in een plastische fase die vooraf kan gaan aan falen (bijv. snelle scheurgroei). Indien

dit het geval is, zijn deze plastisch gedeformeerde zones wellicht terug te vinden met behulp van een tomografische inspectie.

- Voor het kunnen lokaliseren van afwijkingen, zijn kruisende golfpaden nodig. Dit betekent dat voor inspectie van een grotere leidinglengte een grotere openingshoek van de trillingsbron nodig is. Dit lijkt technisch wel haalbaar.
- Kleine defecten in de buiswand verstoren het golfveld nauwelijks en kunnen daarom moeilijk met tomografische technieken worden gevonden.

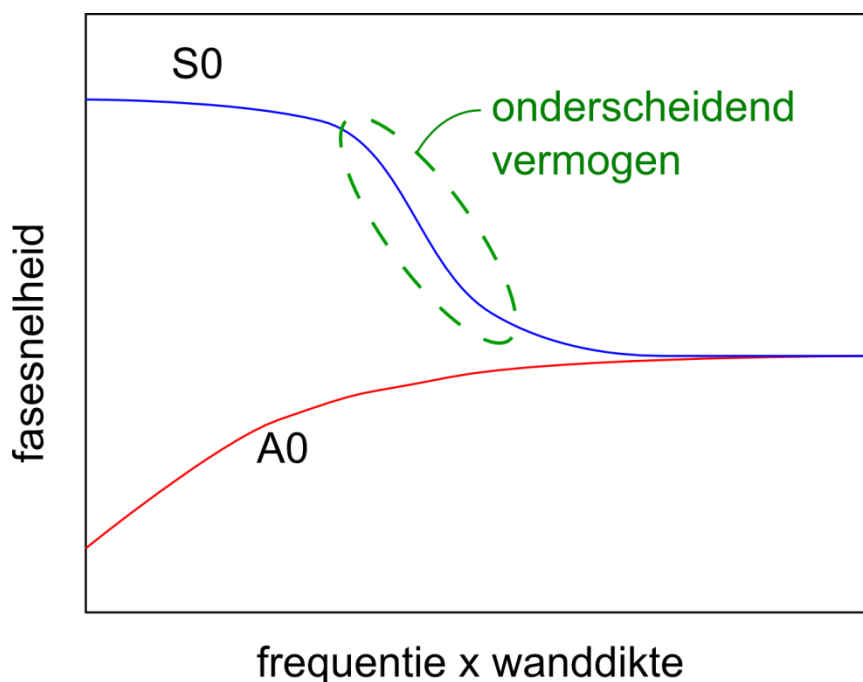
Dieper ingaand op de door hem toegepaste methodiek voor de inspectie van stalen olieleidingen vertelt TvZ het volgende:

- Aankomsttijden van golven zijn veel nauwkeuriger te bepalen dan amplitudes. Daarnaast zijn amplitudes veel gevoeliger voor afwijkingen in de sensor. Men past in de regel in eerste instantie altijd een tomografische inversie op basis van aankomsttijden van golven toe, eventueel later gevolgd door een inversie op basis van de volledige golfvorm.
- Over het algemeen worden de snelste golfmodes gebruikt, omdat deze relatief gemakkelijk te scheiden zijn van de rest van het signaal. Op een gegeven moment gaat echter een omlopende snelle golf tegelijk aankomen met een rechtdoorgaande (niet omlopende) langzamere golf.

Naast de genoemde *guided waves* zou in principe ook gebruik kunnen worden gemaakt van compressiegolven. Deze planten zich echter net zo goed voort buiten de buiswand als erin, waardoor de golfenergie in drie dimensies in plaats van 1 dimensie wordt verspreid en dus snel aan amplitude verliest.

Samenvattend wordt voor de drie meest relevante leidingmaterialen het volgende geconcludeerd:

- |     |  |
|-----|--|
| AC  | Toepasbaarheid van ultrasone tomografie hangt sterk af van de vorm van de dispersiecurves (variëren deze voldoende met variaties in de effectieve wanddikte? zie Figuur 3) en demping door het materiaal (waarschijnlijk sterk).   |
| PVC | TvZ/PvN hebben vernomen dat de dispersiecurves (zie Figuur 3) voor dit materiaal zodanig van vorm zijn dat er weinig variatie in de aankomsttijden van golven te verwachten is, en dat daarmee tomografie op basis van aankomsttijden weinig zal opleveren. Mogelijk is tomografie op basis van demping (golfamplitudes) kansrijker, maar dit concept bevindt zich nog in de ideeënfase. |
| GIJ | Corrosieputjes zullen moeilijk te zien zijn vanwege de omvang hiervan t.o.v. de gebruikte golflengtes. Aangroeiingen aan de binnenwand werken vermoedelijk sterk verstorend. De minimale afstand tussen bronnen en ontvangers is ca. 1 m, de maximale ca. 8 m.   |



*Figuur 3: Zogenaamde dispersiecurves voor twee golfmodes S0 en A0. Wanneer de fasesnelheid weinig varieert als functie van de wanddikte, zullen er weinig verschillen optreden tussen golven die door aangetaste (kleinere effectieve wanddikte) en onaangetaste buisdelen lopen, zodat de eerstgenoemde niet kunnen worden gereconstrueerd. Bij keuze van de juiste golfmode en frequentie is de benodigde onderscheidendheid soms wel te realiseren.*

TvZ en PvN concluderen dat toepassing van de besproken technieken voor de inspectie begraven drinkwaterleidingen weinig kansrijk is vanwege de genoemde potentiële problemen en vanwege het beperkte bereik. Zij zijn van mening dat akoestische of elektromagnetische inspectie met behulp van pigs een betere benadering vormt. Met akoestische inspectie kan in principe een beeld worden gevormd van de binnenwand, de buitenwand en eventuele overgangen in de buiswand. Er zijn in Nederland verschillende partijen die dit principe op olieleidingen toepassen. PvT merkt op dat er in de drinkwaterwereld op dit gebied ook het een en ander gebeurt, maar dat hij het fijne er niet van weet.

Op verzoek van PvT geven TvZ en PvN een overzicht van aan het besprokene gerelateerde gebieden waarop TNO werkzaam is:

- ontwerpen van sensoren voor pigs
- ontwikkelen van processing software voor deze sensorarrays
- contacten met relevante bedrijven voor realisatie nieuw type pig
- testopstellingen maken
- golfvoortplanting en -eigenschappen meten
- groottebepaling van deeltjes
- technieken voor manipulatie van gesuspendeerde deeltjes (van de wand af, naar de wand toe)
- metingen met glasvezelkabels en daaraan gekoppelde sensoren (o.a. chemie)

TvZ en PvN geven aan belangstelling te hebben voor het rapport dat uit dit verkennend onderzoek volgt. PvT zal, indien toestemming hiervoor wordt verkregen, hun het rapport toezenden.