

UNPROTECTED

Samenvatting Konstantinos Makris

Veroudering en faalmechanismen
van PVC-buizen

Tervisiedocument Stichting RIONED

Samenvatting Konstantinos Makris

Veroudering en faalmechanismen van PVC-buizen

Tervisiedocument Stichting RIONED

Tervisiedocument Stichting RIONED

Voorwoord

Dit is de Nederlandstalige samenvatting van het proefschrift '*Ageing of plastic pipes in urban drainage systems*'. Deze samenvatting beschrijft de praktische resultaten van het promotie-onderzoek dat Konstantinos Makris uitvoerde binnen het Kennisprogramma Urban Drainage.

Het Kennisprogramma Urban Drainage is vanuit de sector opgericht om de leerstoel Sanitary Engineering (riolering) aan de TU Delft te versterken. Naast ontwikkeling van nieuwe kennis zorgt het voor nieuwe aanwas van ingenieurs en promovendi op het vakgebied stedelijk waterbeheer. Beide zijn nodig om het hoofd te bieden aan de uitdagingen waarvoor de sector staat, zoals klimaatverandering, doelmatigheid, hergebruik, verouderende infrastructuur, verantwoording en transparantie, en het vinden van kwalitatief hoogwaardig personeel.

Het hoofddoel van het onderzoek van Konstantinos Makris was om de kennis over de veroudering en faalmechanismen van kunststofleidingen uit te breiden en daarmee bij te dragen aan doelmatiger rioolbeheer. Daarnaast was het doel het ontwikkelen van een niet-destructieve methode om de toestand van ondergrondse rioolbuizen te beoordelen. Door het veelvuldig gebruik van PVC voor rioolbuizen, lag de focus op de veroudering van PVC-buizen. De ontwikkelde inspectiemethode is echter ook toe te passen op andere kunststoffen.

Het onderzoek laat zien dat er een grote discrepantie is tussen de bevindingen in de wetenschappelijke literatuur over veroudering van PVC-leidingen en de in de praktijk met inspecties geconstateerde defecten. Er zijn tests uitgevoerd op opgegraven PVC-buizen van verschillende leeftijden. Samen met visueel onderzoek van de opgravingslocatie en verkenning van inspectiegegevens zijn de faalfactoren vastgesteld.

De belangrijkste faaloorzaak is het onzorgvuldig hanteren van de buizen tijdens de aanleg of door graafwerkzaamheden in de directe omgeving van de buizen. Met de niet-destructieve vibro-akoestische techniek kan de fysieke veroudering van kunststofbuizen in reële omstandigheden gedetecteerd worden.

Deze samenvatting bevat de voor de praktijk meest relevante resultaten van het promotie-onderzoek. In het volledige (Engelstalige) proefschrift vindt u details over alle uitgevoerde analyses en resultaten en de volledige theoretische achtergrond van de vibro-akoestische methode voor verouderingsdetectie. Het proefschrift met de detailinformatie en de wetenschappelijke onderbouwing van de resultaten kunt u downloaden via deze link:

<https://repository.tudelft.nl/>

Wij wensen u veel leesplezier en inspiratie toe.

Hilde Niezen, Stichting RIONED
Joost Buntsma, STOWA
Oktober 2022

Inhoud

1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond en aanleiding	7
1.2	Doel van het onderzoek	8
1.3	Leeswijzer	8
2	Veroudering van PVC-rioolbuizen	9
2.1	Onderzoeksdoel	9
2.2	PVC-buizen in de literatuur	9
2.3	PVC-buizen in de praktijk	9
3	Onderzoek naar de faalfactoren van PVC-rioolbuizen	11
3.1	Onderzoeksdoel	11
3.2	Materiaal en methoden	11
3.3	Resultaten	12
3.4	Oorzaken van de defecten	15
4	Vibro-akoestiek voor verouderingsdetectie van kunststofbuizen	16
4.1	Onderzoeksdoel	16
4.2	Materiaal en methoden	17
4.3	Resultaten	19
5	Conclusies en aanbevelingen	23
5.1	Veroudering van PVC-rioolbuizen: de literatuur versus de praktijk	23
5.2	Faalfactoren van PVC-rioolbuizen	23
5.3	Vibro-akoestiek voor verouderingsdetectie van kunststofbuizen	24
5.4	Aanbevelingen en uitdagingen	24
	Woordenlijst	25
	Literatuur	26
	Dankwoord	27

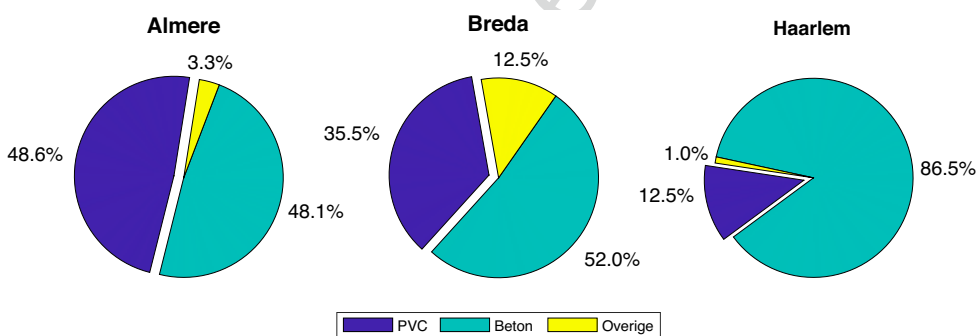
1 Inleiding

1.1 Achtergrond en aanleiding

Dit is de Nederlandse samenvatting van het proefschrift door Konstantinos Makris met de titel "Ageing of plastic pipes in urban drainage systems" bij TU Delft Sanitary Engineering. Dit onderzoek helpt rioolbeheerders een betere inschatting te maken van de restlevensduur en daarmee van doelmatig beheer van kunststof buizen.

Rioolsystemen vormen een kapitaalintensieve infrastructuur, die tijdens de gebruiksfase veroudering ondergaat. De veroudering leidt onder meer tot lekkage, constructieve instabiliteit en verlies aan hydraulische capaciteit. Rioolbeheerders voeren inspecties en onderhoud uit om zo de infrastructuur doelmatig te beheren. Kennis van de constructieve sterkte en stabiliteit van deze systemen en de mogelijkheid om de restlevensduur in te schatten zijn essentieel voor doelmatig beheer. Assetmanagement voor riolering is nu voornamelijk gebaseerd op visuele inspecties. Visuele inspecties worden door vrijwel alle rioolbeheerders gebruikt om een indruk te krijgen van de conditie van de leiding, waarbij vanzelfsprekend alleen zichtbare veroudering kan worden geconstateerd. Niet-zichtbare veroudering, zoals materiaalveroudering van kunststof leidingen, kan niet worden geconstateerd met visuele inspectie. Vooral voor PVC-leidingen, het meest gebruikte kunststof, is het daarom de vraag in hoeverre rioolbeheerders op dit moment kunnen beschikken over de benodigde informatie om te kunnen besluiten over vervanging.

Figuur 1.1 toont de gebruikte leidingmaterialen voor riolering in drie Nederlandse gemeenten, namelijk Almere, Breda en Haarlem. PVC is het meest gebruikte kunststofmateriaal voor vrijval riolen (48,6% in Almere, 35,5% in Breda en 12,5% in Haarlem). De categorie "Overige" in figuur 1.1 omvat voornamelijk andere soorten kunststof materialen (bijvoorbeeld polyethyleen). Almere is de jongste stad van Nederland die grotendeels na 1970 is gebouwd. Het hemelwaterriool bestaat voornamelijk uit betonnen buizen en het vuilwaterriool bestaat voornamelijk uit PVC. In Breda en Haarlem is er meer variatie in gebruikte materialen.



Figuur 1.1
Leidingmaterialen in Almere,
Breda en Haarlem

1.2 Doel van het onderzoek

De factoren die de levensduur van een kunststofbuis beïnvloeden, komen voort uit zowel de productie-, installatie- als de exploitatiefase. Deze factoren hebben een wisselwerking op elkaar, waardoor verschillende faalmechanismen ontstaan. Een hoofddoel van dit onderzoek is om de kennis over de veroudering en faalmechanismen van kunststofleidingen uit te breiden en daarmee bij te dragen aan doelmatiger rioolbeheer. Daarnaast is het doel het ontwikkelen van een niet-destructieve methode om de toestand van ondergrondse rioolbuizen te beoordelen. Door het veelvuldig gebruik van PVC voor rioolbuizen, ligt de focus op de veroudering van PVC-buizen. De te ontwikkelen inspectiemethode is echter ook van toepassing op andere kunststoffen.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bevat een kritische beoordeling van de theoretische duurzaamheid van PVC-rioolbuizen in verschillende casestudies en de werkelijke duurzaamheid via de analyse van inspectiegegevens.

Hoofdstuk 3 onderzoekt de discrepantie tussen de theoretische en werkelijke duurzaamheid van PVC-buizen via het onderzoek van inspectiebeelden, observatie van de opgravingslocatie en uitgebreide laboratoriumtests van acht PVC-rioolbuizen.

Hoofdstuk 4 beschrijft de experimentele toepassing van een niet-destructieve vibro-akoestische techniek voor het detecteren van veroudering in reële omstandigheden.

Hoofdstuk 5 zet de conclusies van dit onderzoek op een rij en geeft aandachtspunten en aanbevelingen voor onderzoekers en rioolbeheerders.

2 Veroudering van PVC-rioolbuizen

2.1 Onderzoeksdoel

Het doel van dit hoofdstuk is om de belangrijkste bevindingen van casestudies van geteste PVC-rioolbuizen uit de literatuur te presenteren en te vergelijken met bevindingen uit inspectiegegevens. De nadruk wordt gelegd op casestudies die de structurele integriteit van het hele rioolstelsel bepalen. De inspectiegegevens zijn afkomstig van vier verschillende gemeenten in Nederland: Almere, Amstelveen, Breda en Haarlem.

2.2 PVC-buizen in de literatuur

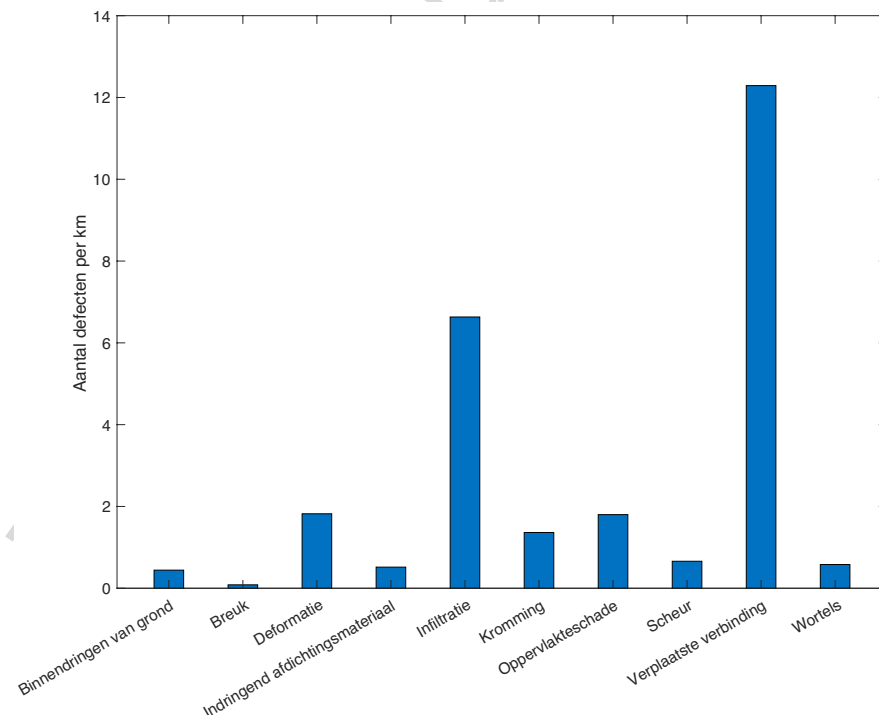
In de literatuur komt een aantal casestudies voor, waaruit blijkt dat:

- PVC een zeer duurzaam materiaal is voor leidingsystemen zonder indicaties van verslechterde fysieke of mechanische eigenschappen (Bauer, 1990; Alferink et al. 1995; Whittle en Tennakoon, 2005; Folkman, 2014).
- Er geen aanzienlijke chemische verandering in de PVC-samenstelling wordt aangetroffen onder invloed van chemicaliën die gewoonlijk in riolen worden aangetroffen (d.w.z. zwavelzuur, natriumsulfaat, natriumhydroxide, natriumhypochloriet, chloordioxide) (Bishop, 1990; Hawkins en Mass, 1994; Fumire 2008; Lasfar et al., 2014). Daarom vindt materiaaldegradatie, indien aanwezig, langzaam plaats.
- De elastomere buisverbindingen intact blijven (dat wil zeggen dat lekkage door de buiswand niet of nauwelijks optreedt), zelfs wanneer ze onderhevig zijn aan overmatige deformatie.

Deze bevindingen hebben geleid tot een algemeen aangenomen theoretische levensduur van PVC-buizen van meer dan 100 jaar. Meer details met betrekking tot veroudering van PVC-rioolbuizen wereldwijd worden gegeven in Makris et al. (2020).

2.3 PVC-buizen in de praktijk

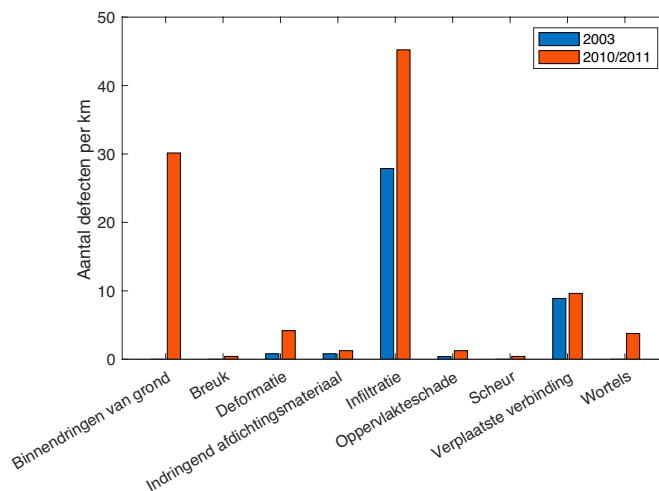
Uit inspectiegegevens van drie Nederlandse gemeenten (Almere, Breda, Haarlem) blijkt dat er wel degelijk defecten zijn die veel aspecten van een rioolstelsel beïnvloeden. Figuur 2.1 geeft de frequentie aan van dergelijke defecten in PVC-buizen volgens NEN 3399. Om de onzekerheid die gepaard gaat met CCTV-inspecties te compenseren (Dirksen et al., 2013), zijn de defecten gecategoriseerd zonder rekening te houden met de ernst. Bovendien maakt genoemde dataset geen noemenswaardig onderscheid in toepassing.



Figuur 2.1
Aantal defecten per kilometer op basis van CCTV-inspecties voor PVC-rioolbuizen van drie Nederlandse gemeenten: Almere, Breda en Haarlem.

Een andere benadering werd gevolgd voor geïnspecteerde PVC-buizen (2,4 km) van de gemeente Amstelveen. Het onderzoek gaat over gegevens van buizen die binnen een paar jaar twee keer zijn geïnspecteerd. Op deze manier werd gecontroleerd of er sprake is van degradatie van PVC-systemen. Uit deze analyse (zie figuur 2.2) blijkt dat de gevonden defecten bij de tweede inspectie vaker voorkomen en dat er ook nieuwe defecten optreden (breuken, scheuren, wortelingroei). Deze veranderingen worden opgemerkt binnen een tijdsbestek van slechts 7-8 jaar.

Figuur 2.2
Aantal defecten per kilometer op basis van CCTV- en Panorama® inspecties van dezelfde PVC rioolbuizen in de gemeente Amstelveen in 2003 (blauw) en in 2010/2011 (rood).



Kuliczowska et al. (2016) presenteerde een reeks vroege defecten die zijn gevonden op nieuw geïnstalleerde PVC-rioolbuizen tijdens CCTV-inspecties. Deze defecten omvatten deuken als gevolg van installatie of bodemverdichting, overmatige vervormingen en onjuiste longitudinale hellingen. Inspectiegegevens uit Almere, Breda en Haarlem geven aan dat er nog meer defecten kunnen ontstaan: oppervlakteschaden, scheuren, verplaatste verbindingen, vernietigd afdichtingsmateriaal, wortelingroei en breuken. Bovendien worden bestaande defecten mogelijk niet gerapporteerd bij CCTV-inspecties vanwege de subjectiviteit van de inspecteur en de inspectie van alleen de binnenzijde van de buis (Dirksen et al., 2013; Van Riel, 2017). Daarom leiden CCTV-inspecties waarschijnlijk tot een optimistische schatting van de toestand van de buis.

Het is vrij duidelijk dat er een discrepantie is tussen wetenschappelijk internationaal onderzoek en wat in de praktijk wordt waargenomen, hoewel het lastig is om de defecten bij CCTV-inspecties te verbinden met de werkelijke toestand van een buis (Van Riel, 2017). Bevindingen in de literatuur hebben geleid tot een algemeen aangenomen theoretische levensduur van meer dan 100 jaar, terwijl uit inspectiegegevens blijkt dat er al binnen enkele decennia ernstige defecten optreden. De duidelijkste discrepantie wordt waargenomen in de duurzaamheid van de elastomere buisverbindingen. De literatuur geeft aan dat lekkage alleen mogelijk is bij extreme deformatie en dat wortelingroei onmogelijk is als de installatie correct is (Sadler et al., 2001). Dit staat echter in contrast met de gepresenteerde aantallen defecten (figuren 2.1 en 2.2), die eenzelfde beeld geven als de resultaten van CCTV-inspecties die zijn gepubliceerd voor Zweden (Stål, 1998) en Denemarken (Randrup, 2000).

Een mogelijk belangrijke reden voor de discrepantie tussen literatuur en praktijk is dat uitgebreide materiaaltests van PVC-rioolbuizen en elastomere buisverbindingen zelden worden uitgevoerd en gerapporteerd, hoewel dit essentieel blijkt om de mate van degradatie en de oorsprong ervan betrouwbaar te beoordelen.

3 Onderzoek naar de faalfactoren van PVC-rioolbuizen

3.1 Onderzoeksdoel

Onderzoek naar opgegraven PVC-rioolbuizen in de literatuur geeft aan dat er geen indicaties zijn van verslechterde fysische, chemische en mechanische eigenschappen. Uit inspectiegegevens blijkt echter duidelijk dat er wel degelijk defecten zijn waardoor degradatie onverwacht snel optreedt. Het doel van dit hoofdstuk is het verkennen van de discrepantie tussen wetenschappelijk onderzoek en observaties in de praktijk door de duurzaamheid van acht opgegraven PVC-rioolbuizen met bekende defecten te onderzoeken. De resultaten van dergelijke uitgebreide materiaaltests bieden de mogelijkheid om mogelijke degradatie te detecteren en de duurzaamheid van de onderzochte buizen te beoordelen.

3.2 Materiaal en methoden

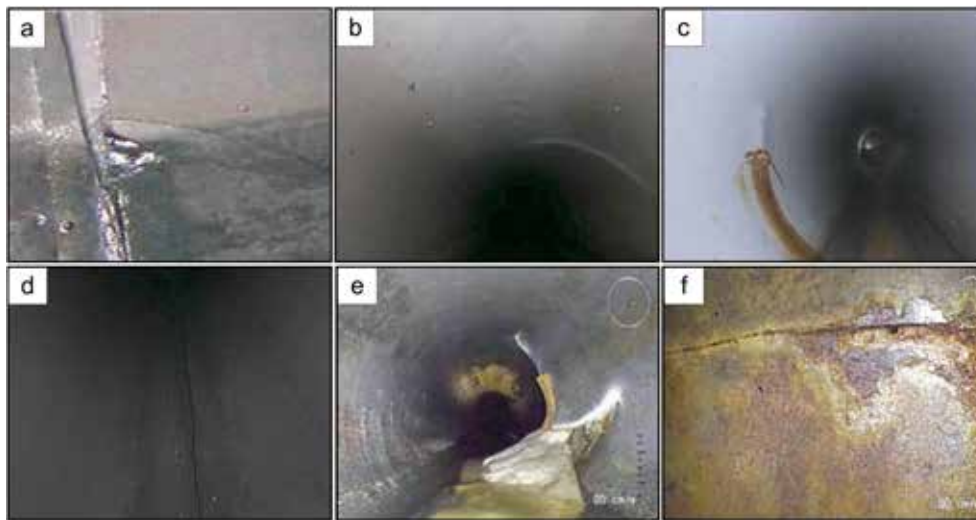
In samenwerking met de gemeenten Almere en Breda zijn acht PVC-buizen opgegraven. De buizen werden gekozen op basis van het jaar van aanleg, aanwezige defecten en de praktische mogelijkheid om de buis in zijn geheel op te graven. De defecten van de opgegraven buizen omvatten scheuren, breuken, vervormingen en wortelingroei. De lengte van de opgegraven buizen was ongeveer één meter onaangetast materiaal naast het deel van de buis met een defect. Eén nieuwe buis is gebruikt als referentie. De belangrijkste kenmerken van de geteste buizen staan vermeld in tabel 3.1.

Monster	Locatie	Leeftijd	DN	Ingebouwde kern	Bodem	Gemiddelde dekking (m)	Defect (EN 13508-2)
A-1	Almere	43	250	-	Klei	1,55	Scheur in de verbinding (BAF)
A-2		42	250	-		2,32	Vervormd bij de kroon (BAF)
A-3		41	250	Leeg		1,52	Breuk aan de zijkant (BAF)
A-4		39	250	Leeg		1,51	Scheur aan de onderkant (BAB)
B-1	Breda	41	250	-	Zand	1,55	Wortelingroei (BBA)
B-2		39	250	-		1,30	Breuk (BAC)
B-3		23	200	Gerecycled		1,58	Gecomplceerde scheur (BAB)
B-4		16	160	Geschuimd		1,16	Wortelingroei (BBA)
R (referentie)	-	-	250	-	-	-	-

Tabel 3.1
Kenmerken van PVC-rioolbuizen die worden gebruikt voor analyses

Buizen A-3 en A-4 zijn geperforeerd over de lengteas en hebben een lege kern, terwijl buizen B-3 en B-4 drielaags zijn met respectievelijk een kern van gerecycled en geschuimd PVC. De rest van de buizen zijn gemaakt van een enkele PVC-laag. Figuur 3.1 laat de inspectiebeelden zien van de buizen die last hadden van een constructief defect. Het defect van buizen B-1 en B-4 was wortelingroei via de elastomere buisverbindingen, waarvan de integriteit niet is meegenomen in het huidige onderzoek. Deze buizen hadden verder geen enkel defect. Uit de opgegraven buizen werden monsters gefreesd, die uitgebreid zijn getest om inzicht te krijgen in de belangrijkste fysische, chemische en mechanische eigenschappen van het materiaal.

Figuur 3.1
 CCTV of Panorama® beelden van opgegraven leidingen:
 a) Leiding A-1 (DN 200, 43 jaar oud) met scheur bij de aansluiting.
 b) Leiding A-2 (DN 200, 42 jaar oud) met vervormde bovenkant.
 c) Leiding A-3 (DN 200, 41 jaar oud) met puntige breuk aan de zijkant.
 d) Leiding A-4 (DN 250, 39 jaar oud) met scheur aan de onderkant.
 e) Leiding B-2 (DN 250, 39 jaar oud) met breuk.
 f) Leiding B-3 (DN 200, 23 jaar oud) met gecompliceerde scheur.



De uitgevoerde tests en analyses op buismateriaal omvatten de bepaling van dichtheid en intrinsieke viscositeit, differentiële scanningcalorimetrie, thermo-gravimetrische analyse, Fouriertransformatie infraroodspectroscopie, dispersieve röntgenfluorescentie, scanning-elektronenmicroscopie en trek- en buigtests. Het doel van deze analyses was het identificeren van indicaties voor materiaalkristallisatie, het karakteriseren van de moleculaire structuur, het bepalen van de thermische eigenschappen (bijv. glas- en ontledingstemperatuur), het detecteren van eventuele veranderingen in carbonyl- en hydroxyfunctionele groepen, het identificeren van de elementaire compositie (stabilisatoren, vulstoffen, pigmenten), het bestuderen van de materiaalmicrostructuur en het bepalen van de mechanische eigenschappen van het materiaal (de trek- en buigsterkte, de rek bij breuk en de elasticiteitsmodulus).

3.3 Resultaten

De resultaten van de uitgebreid geteste buizen brachten aan het licht welke materiaaleigenschappen daadwerkelijk veroudering laten zien en in welke mate. De nadruk is gelegd op de resultaten van mechanische tests, aangezien deze de gevoeligheid voor alle soorten degradatievormen omvatten, inclusief de productie- en installatiekwaliteit (bijvoorbeeld inherente defecten of krassen).

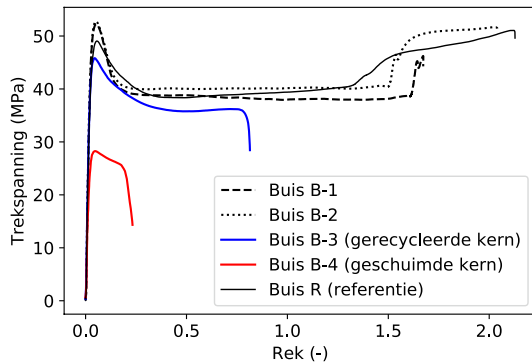
Wat is een trekproef?

Een trekproef is een van de meest populaire mechanische analyses. Bij een trekproef wordt een monster aan beide einden met klemmen vastgezet (zoals in figuur 3.3). Door een aandrijving wordt het monster onder belasting gebracht. De uitgeoefende trekspanning wordt gemeten met een krachtmeetcel, en de verlenging van het monster met een extensiometer.

Wat is een buigproef?

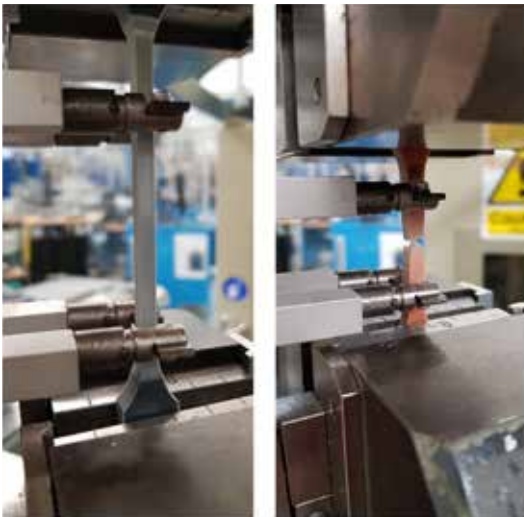
Bij een buigproef wordt een monster aan beide einden vrij gesteund en in het midden belast op één of twee punten (in dit onderzoek op twee punten). Door een aandrijving wordt het monster onder belasting gebracht. De uitgeoefende buigspanning wordt gemeten met een krachtmeetcel, en de deformatie van het monster op basis van de verticale verplaatsing.

De trekproeven (figuur 3.2) lieten een grote variabiliteit tussen de buizen zien. Een toename van de maximale sterkte en elasticiteitsmodulus, en een afname van de rek bij breuk in de enkellaagse PVC-buizen in vergelijking met de referentiebus. Niettemin bleef de rek bij breuk hoog. De bus met een kern van gerecycleerd PVC had een gemiddelde trekspanning vergelijkbaar met de referentiebus, hoewel de breuk eerder optrad. De bus met een kern van geschuimd PVC vertoonde de laagste waarden van ultieme spanning en rek bij breuk.



Figuur 3.2
Spannings- Rekdiagram van trekproeven op één indicatief monster uit: buis B-1 (41 jaar oud), buis B-2 (39 jaar oud), buis B-3 (23 jaar oud, gerecyclede kern), buis B- 4 (16 jaar, geschuimde kern) en buis R (referentiebus).
Verplaatsingsnelheid = 5 mm/min. Testtemperatuur = 24 ± 2 oC.

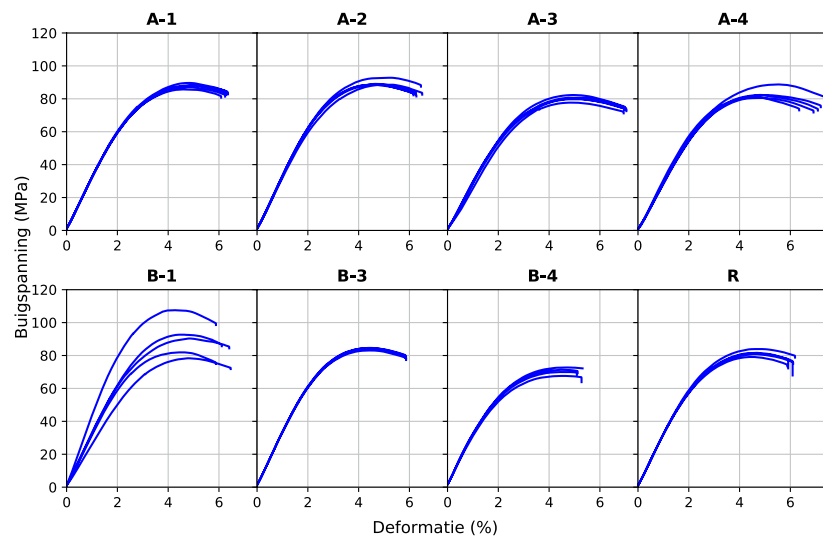
Figuur 3.3 laat twee geteste monsters zien die uit de opgegraven buizen zijn gefreesd: een monster van de enkellaagse buis (links) en een monster van de buis met de kern van geschuimd PVC (rechts). De hogere rek lengte van de enkellaagse buizen tegen trekvervormingen is duidelijk.



Figuur 3.3
Trekproef op monsters die uit de opgegraven buizen zijn gefreesd: enkellaagse buis (links) en buis met een kern van geschuimd PVC (rechts).

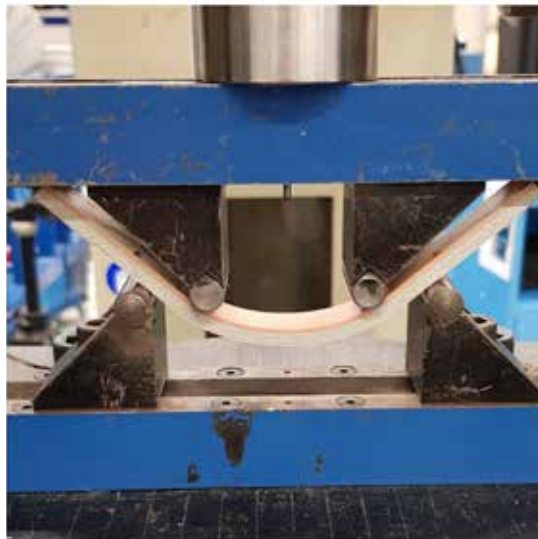
Bij de buigtesten werd hetzelfde patroon als bij trekproeven teruggevonden voor enkellaagse buizen, waarbij oudere buizen hogere waarden voor de ultieme buigsterkte en buigmodulus vertoonden (zie figuur 3.4). Een opvallend resultaat is de hoge variabiliteit bij monsters die uit dezelfde buis kwamen, vooral B-1.

Figuur 3.4
Buigspannings-
deformatiediagram van
4-punts buigtests op vijf
verschillende proefstukken
per buis.
Verplaatsingssnelheid = 15
mm/min (B-3:
verplaatsingssnelheid = 14
mm/min, B-4:
verplaatsingssnelheid = 11
mm/min). Testtemperatuur =
20 ± 0,2 °C.



Figuur 3.5 toont de buigtest van een monster met een geschuimde kern. Dit type buis kan wel veel buigvervormingen verdragen in tegenstelling tot de lagere waarden in de trekproeven.

Figuur 3.5
Buigtest op één monster uit
een buis met een kern van
geschuimd PVC (buis B-4)



De rest van de analyses lieten ook interessante resultaten zien. Bijvoorbeeld XRF-analyse gaf aan dat diverse elementen in de PVC-matrix zitten, zoals stabilisatoren, vulstoffen en pigmenten. PVC blijkt een materiaal te zijn met verschillende elementaire samenstellingen en molecuullengtes (polydispers). Zelfs in buizen die afkomstig zijn uit dezelfde productieperiode en hetzelfde productiebedrijf worden discrepanties gemerkt. Bovendien leek op basis van Fouriertransformatie infraroodspectroscopie (FTIR) de belangrijkste samenstellingsstructuur van PVC intact te zijn, hoewel er enkele indicaties van oxidatie zijn gevonden op verschillende buizen. Er was ook verkleuring (indicatie van chemische aantasting) op verschillende gebieden van het buitenoppervlak en bij het buisdeel dat in contact stond met het rioolwater. De verkleuring was echter beperkt tot het oppervlakteniveau, waarbij algemene tests op verkleurde monsters bewezen dat er geen invloed is op de materiaaleigenschappen.

Details over alle uitgevoerde analyses en resultaten zijn beschikbaar in Makris et al. (2021) of in het proefschrift.

3.4 Oorzaken van de defecten

De verkenning van de materiaaleigenschappen leverde voldoende informatie op over de structurele integriteit van de geteste buizen. De oorsprong van de opgetreden defecten werd echter niet gevonden tijdens het testen. De daadwerkelijke oorzaken zijn gevonden tijdens graafwerkzaamheden of via verkenning van de inspectiegegevens.

- Buis A-1: Doorbuiging van de verbinding leidde tot de storingsoorzaak van buis A-1. Inspectiebeelden gaven duidelijk de hoekbuiging bij de verbinding aan (figuur 1a), wat leidde tot de ontwikkeling van contactpunten tussen de leidingen. Dergelijke contactpunten veroorzaken overmatige buigmomenten en lokale pieken in trekspanningen op de buis. Een slechte installatiekwaliteit en/of differentiële zetting kunnen mogelijke oorzaken zijn (Arsénio, 2013).
- Buis A-2: Zetting en/of slechte bodemverdichting zijn mogelijke faaloorzaken voor de vervormde bovenkant van buis A-2. Bovendien werd deze buis ongeveer 0,8 m dieper in de grond aangelegd in vergelijking met de andere geteste buizen, waardoor de verticale belasting aan de kruin van de buis hoger lag. De bodemgesteldheid in combinatie met de lage buigstijfheid van kunststofbuizen zou kunnen leiden tot dergelijke pre-knikcondities (Stein, 2001).
- Buis A-3: Er werd geen scherp voorwerp (bijv. steen) gevonden in contact met buis A-3 nabij de breuk, terwijl diepe krassen werden waargenomen in het vervormde gebied boven het defect (zie figuur 3.4a). Hierdoor wordt aangenomen dat dit defect wordt veroorzaakt door menselijke activiteit, bijvoorbeeld door graafschade.
- Buis A-4: Uit visuele inspectie van buis A-4 (met een lege kern) bleek dat alleen de binnenste laag van de bodem van de buis was gebarsten. Dus er heeft geen lekkage van afvalwater plaatsgevonden. Deze scheur werd blijikbaar gevormd door de combinatie van deformatie en de lage buigmoduluswaarden van buizen met een lege kern. Deformatie van de buis leidde tot hoge trekspanningen op de 6- en 12-urpositie van de binnenzijde, waardoor deze scheur optrad.
- Buis B-2: Een duidelijke indicatie van een impact door menselijk handelen werd gevonden via visueel onderzoek van de breuk bij buis B-2, waarbij de afdruk van de graafmachine zichtbaar was op de buis (figuur 3.4b). De kans op deze faaloorzaak werd vergroot door de aanleg van andere leidingen dichtbij. Dit leidde misschien tot graafwerkzaamheden in de directe omgeving van de buis.
- Buis B-3: De faaloorzaak van buis B-3 is duidelijk gebrekkige installatie, waarbij de leiding was afgedekt met een extra stuk leiding (figuur 3.4c). De scheur is vervolgens ontstaan op het contactpunt tussen de PVC-buis en de betonnen bescherming van een stadsverwarmingsbuis.
- Buizen B-1 en B-4: Deze buizen hadden geen structureel defect.



Figuur 3.6
In-situ beelden na ontgraving van buizen A-3 (a) en B-2 (b) met breuk door inslag van buitenaf, en buis B-3 (c) met scheur door slechte installatiekwaliteit.

4 Vibro-akoestiek voor verouderingsdetectie van kunststofbuizen

4.1 Onderzoeksdoel

Fysieke veroudering is een onvermijdelijk degradatiemechanisme van visco-elastische (ofwel kunststof) buizen en de mate van veroudering gaat samen met een toename van de elasticiteitsmodulus (ofwel opslagmodulus genoemd in kunststof) van het buismateriaal. Door materiaalveroudering wordt de kunststof stijver en brosser. In dit hoofdstuk wordt een nieuwe methode voorgesteld voor het onderzoek van de veroudering van kunststofbuizen: de laagfrequente vibro-akoestiek. Vibro-akoestiek is een niet-destructieve werkwijze voor de schatting van de opslagmodulus. Bovendien kunnen veranderingen van de opslagmodulus als gevolg van veroudering beter worden gedetecteerd in lage frequenties (Read et al. 1992).

Het testen van de methode moest inzicht geven in de volgende vragen:

- Is de vibro-akoestische methode geschikt om de opslagmodulus van een kunststofbuis te schatten?
- Is de opslagmodulus frequentiegevoelig binnen het laagfrequentiebereik voor fysieke veroudering van de buis?

Achtergrond akoestiek in leidingen

- Wat is de "golfvorm"?

Een golfvorm beschrijft hoe de amplitude van een periodieke trilling verloopt als functie van de tijd. De eenvoudigste golfvorm wordt beschreven via de volgende formule:

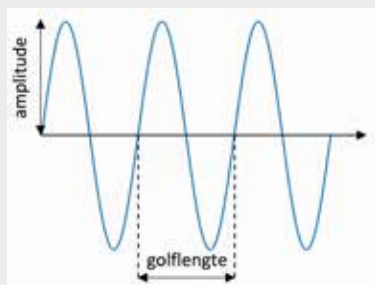
$$x(t) = A \sin(2\pi f t + \varphi) \quad \text{(Vergelijking 4.1)}$$

Waarbij A de amplitude is (de maximale uitslag van de trilling), f de frequentie, t de tijd en φ de fase van de golf.

- Wat is het "golfgetal"?

De fase wordt bepaald door $\varphi = k_z z$, waarbij k_z het golfgetal ($=2\pi/\text{golflengte}$) is en z de voortplantingsafstand.

Figuur 4.1 toont een golfvorm die zich voortplant. Hoe krachtiger de impact, hoe hoger de amplitude van de golf. De golflengte is omgekeerd evenredig met de frequentie. Dus hoe hoger de frequentie, hoe kleiner de golflengte.



Figuur 4.1 Enkelvoudige golfvorm in de ruimte

- Elastische golven in vaste stoffen

Elastische golven bevatten in de praktijk meestal een reeks frequenties. De bekende Fouriertransformatie wordt gebruikt om een golf te scheiden in een aantal individuele golven met hun eigen frequentie, amplitude en fase (inclusief het golfgetal).

Het theoretische deel van dit onderzoek bevat de ontwikkeling van een vergelijking die de golfgetallen van de golven verbindt met de opslagmodulus van de buis. Als de bewegingsvergelijkingen worden opgelost met de aanname dat het gekoppelde systeem in een harmonische trillingstoestand is (zoals weergegeven in figuur 4.1), dan wordt een relatie gelegd tussen de opslagmodulus (E) van het buismateriaal, het golfgetal (k_2) en andere parameters van het systeem:

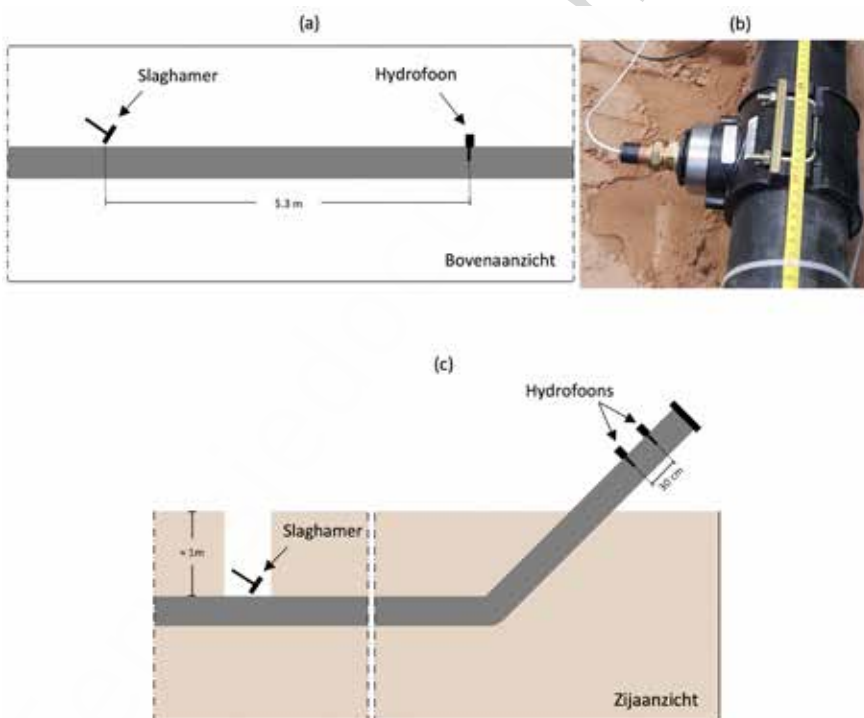
$$E = \text{Functie}(\text{eigenschappen van het buismateriaal, water en grond, } k_2) \quad (\text{Vergelijking 4.2})$$

Er werden drie soorten (axisymmetrische) golven gevonden, die zich bij lage frequenties voortplantten in een met water gevulde buis: de longitudinale golf, de torsiegolf en de watergedragen golf. Als de buis in de grond ligt, kan alleen de watergedragen golf zich voortplanten. Vanwege dit effect is er een voorwaarde dat de geteste buis volledig gevuld is met water.

De volledige theoretische achtergrond van de methode wordt gegeven in het (Engelstalige) proefschrift.

4.2 Materiaal en methoden

De vibro-akoestische methode is in het laboratorium getest door op twee met water gevulde PE-buizen. Eén omgeven door lucht ("Opstelling A") en de andere omgeven door zand ("Opstelling B"). De buizen van de opstellingen hadden een diameter van 110 mm en een wanddikte van 11 mm. De excitatie werd bereikt met een slaghamer en het voortplantingssignaal werd opgenomen met hydrofoons. Figuur 4.2 toont de twee opstellingen en de montage methode van de hydrofoons met de buizen. De afstand tussen het excitatiepunt en de hydrofoon was alleen bekend voor Opstelling A (5,3 m). Deze afstand voor Opstelling B kon niet direct worden gemeten omdat de buis al was ingegraven. Daarom werd een tweede hydrofoon op 0,3 m afstand van de eerste geplaatst om twee ontvangstsignalen op een bekende afstand op te nemen (zie figuur 4.2c). Het opnemen van (minstens) twee signalen op een bekende afstand is een voorwaarde voor de signaalanalyse.



Figuur 4.2
Een illustratie van de experimentele opstellingen (a, c), inclusief het punt van excitatie via de slaghamer, en de locatie van de hydrofoons. De montage methode van de hydrofoons in de buizen wordt ook getoond (b).

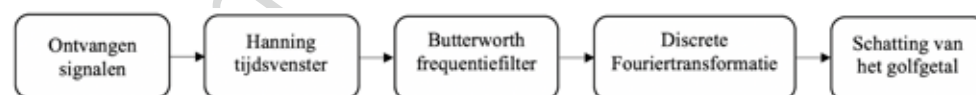
Tabel 4.1 toont de waarden van de eigenschappen van het gebruikte buismateriaal, het water en de grond. De onzekerheden van deze parameters worden ook gegeven. De dichtheid van het buismateriaal is bepaald volgens ISO 1183-1 (immersiemethode) en was $957,6 \text{ kg/m}^3$ met onzekerheid van $1,4 \text{ kg/m}^3$. De geometrie van de buis (wanddikte en inwendige straal) werd ter plaatse bepaald met een meetlint, met een onzekerheid van $0,5 \text{ mm}$. De eigenschappen van het water zijn overgenomen uit de literatuur met geschikte onzekerheden voor temperatuurveranderingen binnen een bereik tussen 10 en $20 \text{ }^\circ\text{C}$. De waarden van de overige eigenschappen zijn ook uit de literatuur overgenomen. Hun onzekerheden zijn geschat op basis van de variabiliteit van de gerapporteerde waarden in verschillende wetenschappelijke bronnen (Kubat et al., 1990; Men et al., 2003; Nitta, 2012; Gao et al., 2017) en de verwachte variabiliteit in de praktijk. De grond in Opstelling B was zand, waarvan de eigenschappen zijn overgenomen uit Gao et al. (2017). De onzekerheden van de bodemparameters zijn hoger in vergelijking met andere media, want de bodem is meestal het medium met de grootste parametervariabiliteit.

Tabel 4.1
Gemeten of aangenomen buis-, water- en bodemeigenschappen en hun onzekerheden gebruikt voor de analyse.

Medium	Parameter	Symbool	Waarde	Onzekerheid
Buis	Dichtheid	ρ (kg/m^3)	957,6	1,4
	Poisson-factor	ν (-)	0,4	0,05
	Verliesfactor	η (-)	0,05	0,01
	Interne straal	R_i (mm)	44	0,5
	Wanddikte	h (mm)	11	0,5
Water	Dichtheid	ρ_f (kg/m^3)	998	2
	Geluidsgolfsnelheid	c_f (m/s)	1481,4	35
Bodem	Dichtheid	ρ_f (kg/m^3)	1500	600
	Compressiegolfsnelheid	c_d (m/s)	200	150
	Schuifgolfsnelheid	c_t (m/s)	100	28

Figuur 4.3 toont het analyseproces voor de onbewerkte signalen om het axiale golfgetal k_z van de watergedragen modus te bepalen. Afhankelijk van de opstelling kunnen signalen worden opgenomen van de slaghamer en de enkele hydrofoon (Opstelling A) of van twee hydrofoons (Opstelling B). Er werd een Hanning-tijdsvenster toegepast op de signalen om de gewenste modus (d.w.z. de watergedragen golf) te isoleren van andere aanwezige modi of effecten (bijvoorbeeld reflecties). Een banddoorlaat Butterworth-frequentiefilter gaf een specifiek laagfrequent bereik.

Figuur 4.3
Het gevolgde proces om het golfgetal uit de ontvangen signalen te schatten.



Vervolgens is met behulp van Discrete Fouriertransformatie een schatting gemaakt van het axiale golfgetal (k_z) van de voortplantende watergedragen golf. Het axiale golfgetal werd geschat op basis van het verschil in de fase (φ) tussen de twee opgenomen signalen en de afstand daartussen. De experimenten werden 10 keer uitgevoerd voor elke experimentele opstelling en signalen zijn opgenomen met een bemonsteringsfrequentie van 12 kHz .

Wat is een tijdsvenster?

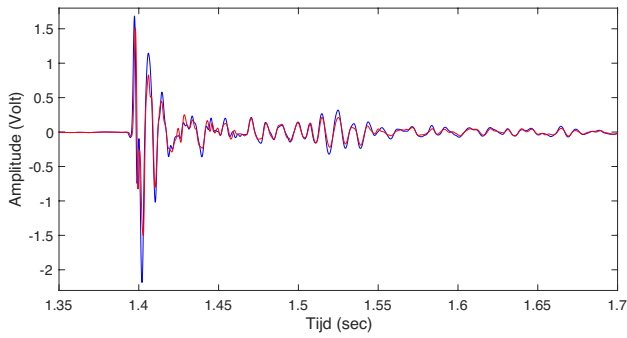
Een tijdsvenster is een wiskundige functie die nul is buiten een bepaald interval. Het is meestal symmetrisch rond het midden van het interval waar het maximum is. Een tijdsvenster wordt vermenigvuldigd met een signaal om een nieuw signaal te genereren dat ook nul is buiten het gekozen interval.

Wat is een banddoorlaatfrequentiefilter?

Een banddoorlaatfrequentiefilter laat frequenties binnen een specifiek frequentiebereik toe en weigert frequenties buiten dat bereik. Het wordt gebruikt om de signalen te isoleren die frequenties hebben tussen twee drempelfrequenties.

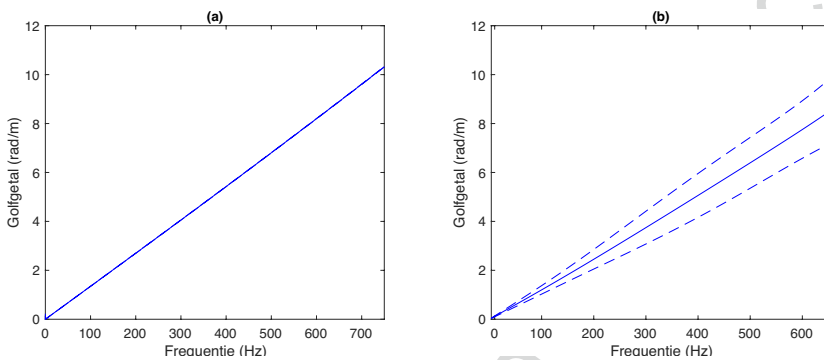
4.3 Resultaten

Een voorbeeld van de opgenomen onbewerkte signalen van de twee hydrofoons in Opstelling B wordt weergegeven in figuur 4.4.



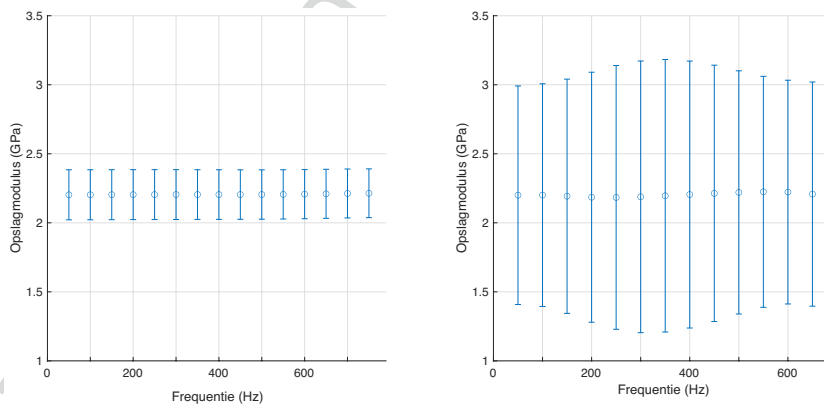
Figuur 4.4
Voorbeeld van onbewerkte signalen ontvangen door twee hydrofoons bij Opstelling B.

De toepassing van de signaalanalyse (figuur 4.3) geeft het golfgetal van de watergedragen golf voor Opstelling A (figuur 4.5a) en Opstelling B (figuur 4.5b) ten opzichte van trillingsfrequentie. Afhankelijk van de opstelling wordt een ander frequentiebereik bereikt waarbij de resultaten consistent zijn (0 - 750 Hz voor Opstelling A en 0 - 650 voor Opstelling B). Opstelling B vertoont een lager gemiddeld golfgetal binnen het geteste frequentiebereik vanwege de toegevoegde stijfheid van de omringende grond. Bovendien laten de resultaten voor Opstelling B relatief bredere betrouwbaarheidsintervallen zien, wat een hogere onzekerheid betekent in vergelijking met Opstelling A.



Figuur 4.5
Het golfgetal als functie van de frequentie voor Opstelling A (a) en Opstelling B (b). Dit is de gemiddelde waarde van tien onafhankelijke metingen. De stippellijnen geven het 95%-betrouwbaarheidsinterval aan.

De combinatie van experimentele resultaten voor het axiale golfgetal met de materiaalparameters uit tabel 4.1 en vergelijking 4.2 leidt tot de schatting van de opslagmodulus. De geschatte waarden van de opslagmodulus en de respectieve onzekerheid (95% betrouwbaarheidsinterval) zijn weergegeven in figuur 4.6. In beide opstellingen ligt de opslagmodulus rond 2,2 GPa in het laagfrequente bereik. Bij opstelling B is sprake van een relatief hogere onzekerheid met maximale onzekerheden tussen 200 en 400 Hz.



Figuur 4.6
De geschatte buisopslagmodulus als functie van de frequentie voor Opstelling A (a) en Opstelling B (b). De foutbalken geven het 95%-betrouwbaarheidsinterval aan.

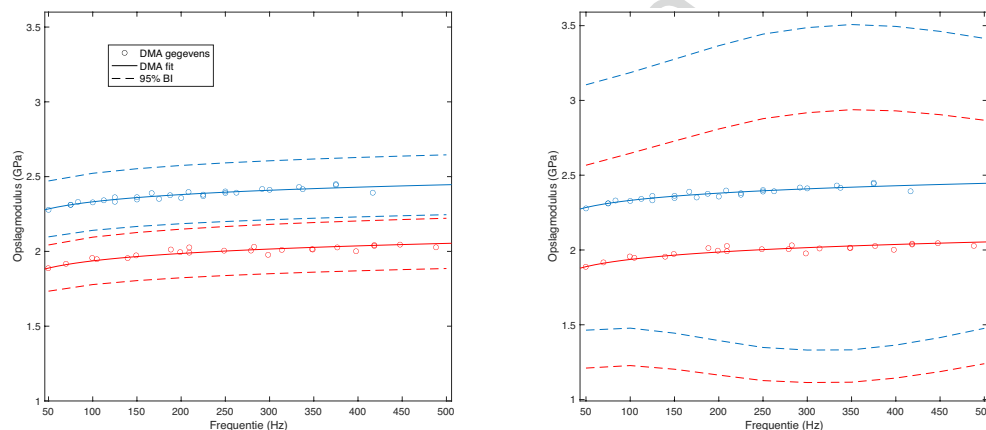
De succesvolle toepassing van vibro-akoestiek om de fysieke veroudering van kunststofbuizen te bepalen is afhankelijk van twee voorwaarden:

1. Vibro-akoestiek kan worden gebruikt om de opslagmodulus van een kunststofbuis te schatten.
2. De opslagmodulus is frequentiegevoelig voor fysieke veroudering van de buis.

De eerste voorwaarde is bewezen omdat de vibro-akoestische experimenten consistente resultaten geven voor de opslagmodulus, ongeacht het omringende medium (figuur 4.6).

De tweede voorwaarde is onderzocht in twee PVC-rioolbuizen: een 3 jaar oude ongebruikte buis en een 44 jaar oude rioolbuis. In deze analyse werd de opslagmodulus geschat via dynamische mechanische analyse (DMA). DMA is een destructieve test die wordt gebruikt als alternatief voor vibro-akoestiek om de opslagmodulus te bepalen als functie van de trillingsfrequentie. De resultaten van DMA worden gecombineerd met de onzekerheid van de vibro-akoestische experimenten. De gemeten onzekerheid van de opslagmodulus voor de twee verschillende opstellingen (Opstelling A en Opstelling B) werd als percentage toegepast op de resultaten opgenomen uit de DMA (zie figuur 4.7).

Figuur 4.7
De opslagmodulus van twee buismonsters als functie van frequentie na toepassing van tijd-temperatuursuperpositie op gegevens opgenomen door dynamische mechanische analyse: a) 3 jaar oude buis (rood), b) 44 jaar oude buis (zwart). De betrouwbaarheidsintervallen zijn gerelateerd aan de onzekerheidsniveaus die worden gevonden in de schatting van de opslagmodulus voor Opstelling A (a) en Opstelling B (b).



Wat is de Dynamische Mechanische Analyse (DMA)?
 Dynamische mechanische analyse (afgekort DMA) is een techniek die wordt gebruikt om materialen te onderzoeken, met name het visco-elastische materiaalgedrag van polymeren. Er wordt een sinusvormige spanning aangebracht en de rek in het materiaal wordt gemeten. Dit leidt tot de bepaling van de dynamische modulus. De dynamische modulus is de verhouding van spanning tot rek onder trillingsomstandigheden.

Wat is de tijd-temperatuursuperpositie?
 Een typisch DMA-apparaat kan de visco-elastische eigenschappen van materialen meten binnen een bepaald frequentiebereik (meestal < 100 Hz). Het tijd-temperatuursuperpositieprincipe wordt gebruikt om dit frequentiebereik uit te breiden naar hogere frequenties (zelfs tot MHz).

De resultaten verkregen met DMA voor de twee PVC-buismonsters (met een leeftijdsverschil van 41 jaar) tonen een duidelijk verschil in de gemeten opslagmodulus. Het oudere monster vertoont een hogere opslagmodulus vanwege de lagere vervormbaarheid. Het waargenomen verschil in de opslagmodulus neemt af met toenemende frequentie. Dit patroon volgt de bevindingen in de literatuur over de moeilijkheid van verouderingsdetectie bij hogere frequenties. Het schatten van de opslagmodulus met vibro-akoestiek betekent echter een hogere onzekerheid die voortkomt uit individuele onzekerheden in de parameters in elk medium. Dit beïnvloedt de methode om nauwkeurig veroudering te bepalen. De resultaten laten zien dat het een uitdaging is om onderscheid te maken tussen verschillende opslagmoduluswaarden voor de opstelling waarin zand de buis omringt (Figuur 9(b)). Maar de onzekerheid wordt niet alleen beïnvloed door de aanwezigheid van grond. De afstand tussen de punten waar de signalen zijn opgenomen zijn ook verschillend (5,3 m in Opstelling A en 0,3 m in Opstelling B).

Met een onzekerheidsanalyse bepalen we welke parameters we nauwkeuriger moeten kennen om de geschatte opslagmodulus nauwkeuriger te kunnen bepalen. Op die manier kunnen we ook de veranderingen als gevolg van veroudering beter bepalen.

Er is een normalisatie gemaakt ten opzichte van de maximale onzekerheidsbijdrage bij elke geteste frequentie. De genormaliseerde onzekerheid van de opslagmodulus $u(E)_{norm}$ voor elke parameter x_i wordt gedefinieerd als:

$$u(E)_{norm} = \frac{u(E)_{x_i}}{\max(u(E)_{x_1}, \dots, u(E)_{x_N})}$$

(Vergelijking 4.3)

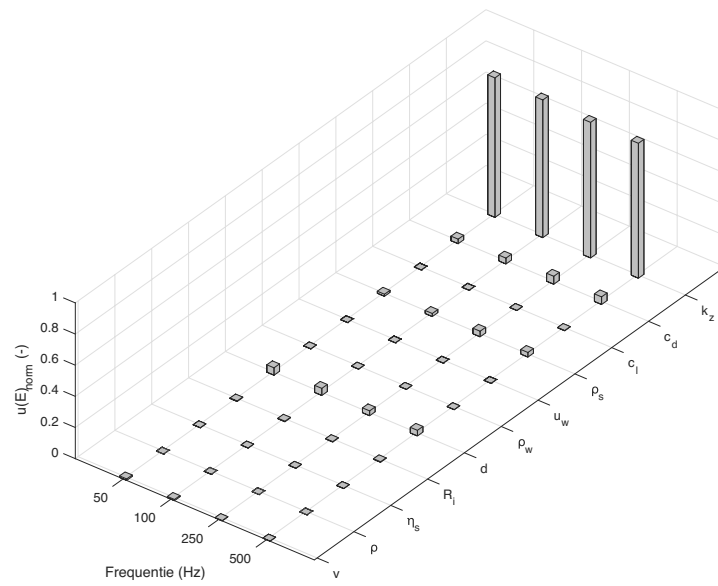
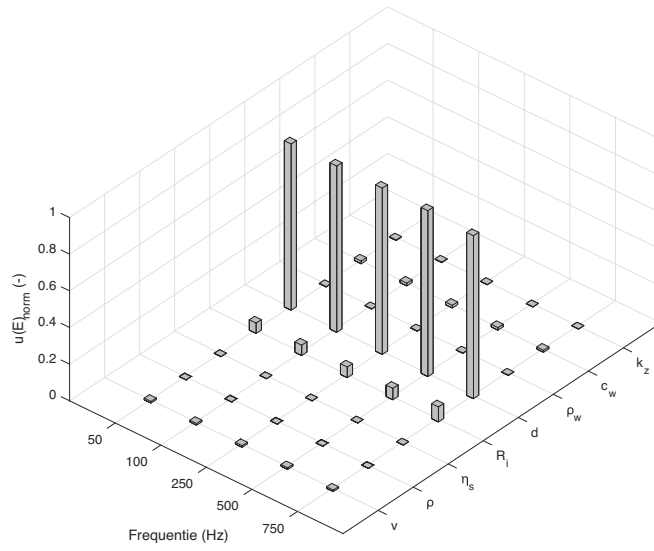
Waarbij $u(E)_{(x_i)}$ de onzekerheid in de opslagmodulus is die wordt veroorzaakt door de individuele onzekerheid van parameter x_i bij een bepaalde frequentie, en N het totale aantal parameters is.

Figuur 4.8 geeft de genormaliseerde relatieve bijdrage weer van de onzekerheid van elke parameter aan de onzekerheid van de schatting van de opslagmodulus voor Opstelling A (a) en Opstelling B (b).

De afgeleide onzekerheid in de opslagmodulus uit Opstelling A komt voornamelijk voort uit een minder nauwkeurige meting van de buisgeometrie, vooral de buiswanddikte. Opvallend is dat als de onzekerheid in de wanddikte en inwendige straal afneemt van 0,5 naar 0,1 mm, de onzekerheid in de schatting van de opslagmodulus van de leiding daalt van ~0,2 naar ~0,04 GPa. Hierdoor zou de voorgestelde methode gevoelig genoeg kunnen worden voor de modulusveranderingen als gevolg van veroudering. De onzekerheid in de opslagmodulus uit Opstelling B wordt vergroot door de onzekerheid in het axiale golfgetal ($u(k_z)$).

De afstand tussen de hydrofoons is ook een beïnvloedende parameter. Hoe kleiner de afstand tussen de hydrofoons, hoe groter de onzekerheid. Dit effect is ook weergegeven in de breedte van betrouwbaarheidsintervallen van het axiale golfgetal in figuur 4.5. Mogelijke redenen hiervoor zijn onder meer een inconsistente koppeling op het grensvlak tussen de buis en het zand en/of de toevoeging van een elastomere buisverbinding in deze opstelling. Dit onderzoek beschouwt aanzienlijk hogere onzekerheden op de bodemparameters in vergelijking met het buismateriaal en water (tabel 4.1). De resultaten in figuur 4.8(b) laten echter zien dat de bijdrage aan het effect van de onzekerheden in de bodemparameters vergelijkbaar is met de bijdrage van de onzekerheid in de buiswanddikte. Dus wordt opgemerkt dat de kennis van de bodemeigenschappen wel relevant is, maar niet de grootste bijdrage levert aan de onzekerheid.

Figuur 4.8
Relatieve bijdrage van de onzekerheid van elke parameter aan de onzekerheid van de schatting van de buisopslagmodulus $u(E)$ voor Opstelling A (a) en Opstelling B (b). $u(E)$ is genormaliseerd volgens vergelijking 4.3 (v: Poissonfactor van de buis, ρ : buisdichtheid, η_s : buisverliesfactor, R_i : interne straal van de buis, d : wanddikte van de buis, ρ_f : waterdichtheid, c_f : geluidsgolfsnelheid van water, ρ_s : bodemdichtheid, c_d : compressiegolfsnelheid van de bodem, c_d : schuifgolfsnelheid van de bodem, k_z : axiaal golfgetal).



5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Veroudering van PVC-rioolbuizen: de literatuur versus de praktijk

Er is een grote discrepantie tussen de bevindingen in de wetenschappelijke literatuur over veroudering van PVC-leidingen en de in de praktijk met inspecties geconstateerde defecten.

Internationale literatuur:

- Onderzoek naar de fysische en mechanische eigenschappen van PVC-buizen toont aan dat PVC op zichzelf een zeer duurzaam materiaal is. PVC-materiaal vertoont geen indicaties van degradatie bij het testen met stoffen die in riolen worden aangetroffen, zoals zwavelzuur, natriumsulfaat en chloorhoudende desinfectiemiddelen.
- Alleen extreme vervormingen bij de elastomere buisverbindingen veroorzaken lekkages.
- Deze bevindingen hebben geleid tot een algemeen aangenomen theoretische levensduur van meer dan 100 jaar.

In de praktijk:

- Uit inspectiegegevens blijkt dat er allerlei bekende defecten worden aangetroffen. Deze defecten beïnvloeden de constructieve stabiliteit, de hydraulische capaciteit en/of de lek-dichtheid van het rioolsysteem.
- De ernst van deze defecten neemt relatief snel toe, waardoor degradatie onverwacht snel optreedt.
- Defecten met betrekking tot de integriteit van elastomere buisverbindingen vormen het grootste aandeel in de defecten.

5.2 Faalfactoren van PVC-rioolbuizen

Op basis van uitgebreide tests op opgegraven buizen, visueel onderzoek van de opgravinglocatie en verkenning van inspectiegegevens maken we de volgende opmerkingen:

- Er is een grote heterogeniteit met betrekking tot het aantal en de soorten anorganische elementen die worden aangetroffen in de samenstelling van verschillende PVC-buizen. Afwijkingen in eigenschappen tussen buizen komen voort uit deze heterogeniteit.
- Er zijn kleine indicaties van chemische degradatie die beperkt is tot het oppervlak van de buis. Dit bewijst de chemische bestendigheid van PVC-materiaal tegen stoffen die in riolen worden aangetroffen.
- Mechanische tests op opgegraven drielaagse buizen (met een kern van gerecycled of geschuimd PVC) hebben aangetoond dat het aanbrengen van gelaagde buiswandconstructies potentieel een kritische factor is voor de duurzaamheid van de buis.
- De testresultaten lieten zien dat fysieke veroudering op grote schaal optreedt terwijl andere degradatiemechanismen een minimaal of geen effect hadden op de onderzochte buizen.
- De belangrijkste faaloorzaak is het ongecontroleerd hanteren van de buizen tijdens de aanleg of door graafwerkzaamheden in de directe omgeving van de buizen. Dit toont aan dat degradatiemechanismen van kunststofbuizen niet de enige of belangrijkste zijn.

5.3 Vibro-akoestiek voor verouderingsdetectie van kunststofbuizen

Ontwikkeling en het testen van de voorgestelde vibro-akoestische methode leidde tot de volgende conclusies:

- Als de buis in de grond ligt, kan alleen een watergedragen golf zich voortplanten. Vanwege dit effect is er een voorwaarde dat de geteste buis volledig gevuld is met water.
- De toepasbaarheid van de methode is eenvoudig. De excitatie wordt slechts via een slaghamer bereikt en het voortplantingssignaal wordt met hydrofoons opgenomen.
- Het gebruik van lagere geluidsfrequenties is gunstig omdat het een hogere gevoeligheid voor veroudering mogelijk maakt en omdat het aantal voortplantingsmodi wordt beperkt, waardoor de algehele analyse wordt vereenvoudigd.
- Ongeacht het medium dat de buis omringt (lucht of grond), moet de afstand tussen de meetpunten van de opnamesignalen zo groot mogelijk zijn.
- Het is essentieel om te zorgen voor nauwkeurige kennis van de geometrie van de buis, d.w.z. de wanddikte en interne straal.
- De kennis van de bodemeigenschappen is wel relevant, maar het levert niet de grootste bijdrage aan de onzekerheid.

5.4 Aanbevelingen en uitdagingen

Algemeen

- De belangrijkste factor die de levensduur van kunststof (PVC) buizen beïnvloedt, is menselijk handelen. Voorgestelde maatregelen zijn onder meer strengere protocollen en streng toezicht op de behandeling en aanleg van leidingen.
- De ontwikkeling van de vibro-akoestische methode voor verouderingsdetectie is gebaseerd op de aannames dat de vaste media (buis en grond) homogeen en (visco)elastisch zijn, terwijl het contact tussen de buis en grond perfect is en de doorsnede van de buis volledig circulair is. Afwijking van deze omstandigheden (in de praktijk veel verwacht), zou ook een afwijking opleveren in de schatting van de opslagmodulus van het materiaal van de buis.
- Verder onderzoek naar de voorgestelde vibro-akoestische methode is gunstig voor een succesvolle toepassing in de praktijk. De toepasbaarheid kan worden getest in een systeem met elastomere verbindingen of huishoudelijke verbindingen (met verschillende niveaus van intrusie in de hoofdbuis).
- De onzekerheid kan afnemen door het gebruik van nauwkeurigere methoden om de dikte (bijv. ultrasoon) en de straal van de buis te meten (bijv. laserscanning).
- De toevoeging van meer sensoren (zoals hydrofoons) zou leiden tot een betere scheiding van verschillende voortplantingsmodi en het meten van golfdemping.
- Elastomere verbindingen hebben de hoogste defectpercentages op basis van de beschikbare inspectiegegevens van riolering. Ondanks het effect van de kwaliteit van de aanleg, is het belangrijk om de bestendigheid van verbindingen te testen tegen typische chemicaliën en bacteriën die in rioolwater worden aangetroffen. Daarom wordt aanbevolen om soortgelijke tests en analyses uit te voeren als beschreven in hoofdstuk 3, maar aangepast voor elastomeermaterialen.

Rioolbeheerders

- PVC-buizen zijn de meest gebruikte kunststof vrijvalbuizen in Nederland. Hun chemische resistentie is bekend en wordt ook door dit onderzoek bevestigd. Uit het onderzoek kwam naar voren dat PVC-buizen in de inspectiedatabases netjes worden geregistreerd als “PVC”, waarbij geen rekening wordt gehouden met de verschillende buissamenstellingen (bijvoorbeeld een interne kern). Zo werden in dit onderzoek van de acht opgegraven rioolbuizen vier verschillende soorten PVC-buizen gevonden: enkellaags, met een gerecyclede kern, met een geschuimde kern en met een lege kern. Kennis van welke soort buis is aangelegd is belangrijk, want de mechanische duurzaamheid verandert afhankelijk van de samenstelling van de buis.
- Een opzichter inhuren voor supervisie tijdens het leggen of vervangen van buizen is een voordeel voor iedereen. Menselijke fouten vormen een frequente oorzaak van defecten.
- PVC-buizen lijden onvermijdelijk aan fysieke veroudering, wat leidt tot brozere buizen. De overgang van een ductiel naar een brozer materiaalgedrag als gevolg van fysieke veroudering is cruciaal voor de mechanische prestaties van buizen. Verouderde kunststofbuizen kunnen tijdens bepaalde werkzaamheden (bijv. de inspectie van buizen of bij het realiseren van nieuwe huisaansluitingen) problemen krijgen met hun stabiliteit. Dit kan een potentiële bedreiging vormen voor de kunststof rioleringen wereldwijd. Daarom is het noodzakelijk om informatie te verkrijgen over het verouderingsproces van het buismateriaal.

Woordenlijst

Woord	Betekenis
Constructief defect	Een defect dat het vermogen van een structuur om belasting te weerstaan vermindert
Deformatie	Vervorming
Degradatie	De eigenschappen van het materiaal veranderen en de structuur wordt zwakker
Differentiële zetting	De grond wordt ongelijk samengedrukt
Discrepantie	Afwijking
Ductiel	Vervormbaar
Duurzaam	Langdurig
Elasticiteitsmodulus	Het geeft de mate aan waarin een materiaal weerstand aan vervorming biedt en waarin een materiaal zonder vervorming de originele vorm kan terugkrijgen.
Elastomeer	Synthetische polymeer met rubberachtige eigenschappen
Excitatie	De trilling van een structuur (bijv. door de slaghamer)
Inherent defect	Een defect dat voortkomt uit het productieproces (bijv. vreemde stoffen of kleine hallen)
Intrusie	Binnendringing
Opslagmodulus	Het is vergelijkbaar met de elasticiteitsmodulus en toont het gedrag van het materiaal onder een oscillerende belasting
Polydispers	De polymeermoleculen zijn niet allemaal even lang
Structurele integriteit	Een term die het vermogen uitdrukt van een structuur om een belasting te weerstaan

Literatuur

- Alferink, F., Guldback, E., and Grootook, J. (1995). Old PVC gravity sewer pipes: Long term performance. In Proceedings of the 9th International Conference on Plastics Pipes, Edinburgh, Scotland, UK.
- Arsenio, A. M. (2013). Lifetime prediction of PVC push-fit joints (Doctoral Dissertation). PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. 10.4233/uuid:18a79a31-abd9-4f24-81f5-15935e3523d0.
- Bauer, D. (1990). 15 year old polyvinyl chloride (PVC) sewer pipe; A durability and performance review. In Buczala, G. and Cassady, M., editors, STP1093-EB buried plastic pipe technology, pages 393–401. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/STP42134S.
- Bishop, R. (1990). Retention of pipe stiffness for polyvinyl chloride (PVC) pipe samples exposed to various environments and constant strain. In Buczala, G. and Cassady, M., editors, STP1093-EB buried plastic pipe technology, pages 7–20. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/STP42110S.
- Dirksen, J., Clemens, F. H. L. R., Korving, H., Cherqui, F., Le Gauffre, P., and Snaterse, C. T. M. (2013). The consistency of visual sewer inspection data. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9:214–228. DOI: 10.1080/15732479.2010.541265.
- Folkman, S. (2014). Validation of the long life of PVC pipes. In Proceedings of the 17th International Conference on Plastics Pipes, Chicago, USA.
- Fumire, J. (2008). Resistance of PVC pipes against disinfectants. In Proceedings of the 14th International Conference on Plastics Pipes, Budapest, Hungary.
- Gao, Y., Muggleton, J. M., Liu, Y., and Rustighi, E. (2017). An analytical model of ground surface vibration due to axisymmetric wave motion in buried fluid-filled pipes. *Journal of Sound and Vibration*, 395:142–159. DOI: 10.1016/j.jsv.2017.02.022.
- Hawkins, T. W. and Mass, T. R. (1994). The effects of sulfuric acid on calcium carbonate filled PVC sewer pipe compounds. In Eckstein, D., editor, STP1222 Buried plastic pipe technology (Vol. 2, pp. 167–179). ASTM International, Philadelphia, PA.
- Kubat, J., Rigdahl, M., and Welander, M. (1990). Characterization of interfacial interactions in high density polyethylene filled with glass spheres using dynamic-mechanical analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, 39(7):1527–1539. DOI: 10.1002/app.1990.070390711.
- Kuliczowska, E. and Zwierzchowska, A. (2016). A qualitative analysis of early defects present in PVC-U sewers but not observed in rigid pipes. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 56:202–210. DOI: 10.1016/j.tust.2016.03.013
- Lasfar, S., Mouallif, I., Latrach, A., Chergui, M., H., Choukir, A., and Diab, A. (2014). Resistance of different materials used in sewers systems: Polyvinyl chloride (PVC), polypropylene (PP) and high-density polyethylene (HDPE), to sulfuric acid and sodium sulfate attack. *International Journal Engineering Research and Applications*, 4:670–678.
- Makris, K. F., Langeveld, J., & Clemens, F. H. (2020). A review on the durability of PVC sewer pipes: research vs. practice. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(6), 880-897.
- Makris, K. F., Langeveld, J. G., & Clemens, F. H. (2021). Extensive testing on PVC sewer pipes towards identifying the factors that affect their operational lifetime. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1-13.
- Meerman, M. (2008). Lifetime expectancy of PVC-U pipelines for sewer systems. In Proceedings of the 14th International Conference on Plastics Pipes, Budapest, Hungary.
- Meijering, T. G., Wolters, M., and Hermkens, R. J. (2004). The durability of a low pressure gas distribution system of ductile PVC. In Proceedings of the 12th International Conference on Plastics Pipes, Milan, Italy.
- Men, Y., Rieger, J., Endeler, H.-F., and Lilje, D. (2003). Mechanical process in polyethylene. *Macromolecules*, 36(13):4689–4691. DOI: 10.1021/ma0344902.
- Nitta, K.-h. and Yamana, M. (2012). Poisson's ratio and mechanical nonlinearity under tensile deformation in crystalline polymers. *Rheology*, Open Access; Vicente, JD, Ed.; Intec: Rijeka, Croatia, pages 113 – 132.
- Randrup, T. (2000). Occurrence of tree roots in Danish municipal sewer systems. *Arboricultural Journal*, 24:283–306. DOI: 10.1080/03071375.2000.9747.
- Read, B. E., Dean, G. D., Tomlins, P. E., and Lesniarek-Hamid, J. L. (1992). Physical ageing and creep in PVC. *Polymer*, 33 (13):2689–2698. DOI: 10.1016/0032-3861(92)90439-4.
- Sadler, P. A., Burn, L. S., and Whittle, A. J. (2001). Elastomeric pipe joint performance requirements for use in PVC sewer pipelines. In Proceedings of the 11th International Conference on Plastics Pipes, Munich, Germany.
- Stål, Ö. (1998). The interaction of tree roots and sewers: The Swedish experience. *Arboricultural Journal*, 22:359–367. DOI: 10.1080/03071375.1998.9747221
- Stein, D. (2001). Rehabilitation and maintenance of drains and sewers. Ernst & Sohn, Berlin.
- Tscheikner-Gratl, F., Caradot, N., Cherqui, F., Leitão, J. P., Ahmadi, M., Langeveld, J. G., Gat, Y. L., Scholten, L., Roghani, B., Rodríguez, J. P., Lepot, M., Stegeman, B., Heinrichsen, A., Kropp, I., Kerres, K., do Céu Almeida, M., Bach, P. M., de Vitry, M. M., Marques, A. S., Simões, N. E., Rouault, P., Hernandez, N., Torres, A., Wery, C., Rulleau, B., and Clemens, F. (2019). Sewer asset management – state of the art and research needs. *Urban Water Journal*, 16(9):662–675. DOI: 10.1080/1573062X.2020.1713382.
- Van Riel, W. (2017). On decision-making for sewer replacement (Doctoral Dissertation). Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. DOI: 10.4233/uuid:92b10448-795d-43ac-8071-d779af9d374d.
- Whittle, A. J. and Tennakoon, J. (2005). Predicting the residual life of PVC sewer pipes. *Plastics, Rubber and Composites*, 34:311–317. DOI: 10.1179/174328905X59773.

STOWA en Stichting RIONED in het kort

Stichting RIONED is de koepelorganisatie voor de riolering en het stedelijk waterbeheer in Nederland. In RIONED participeren alle partijen die bij de rioleringszorg betrokken zijn: overheden (gemeenten, waterschappen, rijk en provincies), bedrijven (leveranciers, adviesbureaus, inspectiebedrijven en aannemers) en onderwijsinstellingen. De belangrijkste taak van Stichting RIONED is het beschikbaar stellen van kennis aan de vakwereld. Dit doet RIONED door onderzoek, het bundelen van bestaande kennis en het op vele manieren informeren en bij elkaar brengen van professionals.

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

Dankwoord

Het hier gepresenteerde promotieonderzoek is tot stand gekomen met de steun en inzet van de partners in het Kennisprogramma Urban Drainage (in alfabetische volgorde):

ARCADIS, Deltares, de gemeenten Almere, Arnhem, Breda, Den Haag, Rotterdam en Utrecht, GMB Rioleringstechnieken, Grontmij, KWR Watercycle Research Institute, Royal HaskoningDHV, Stichting RIONED, STOWA, Tauw, Vandervalk+degroot, Waterschap De Dommel, Waternet en Witteveen+Bos.

Een speciaal dankwoord gaat uit naar de gemeenten Almere en Breda voor hun actieve bijdrage aan dit promotieonderzoek.

© 2022 Stichting RIONED en STOWA

Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.

Disclaimer

Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van deze publicatie.

promotoren

Prof. dr. ir. F.H.L.R. Clemens (Technische Universiteit Delft)

Dr. ir. J.G. Langeveld (Technische Universiteit Delft)

Prof. dr. K. Horoshenkov (The University of Sheffield)

auteur

Konstantinos Makris (Technische Uniersiteit Delft)

omslagfoto

Konstantinos Makris (Technische Uniersiteit Delft)

vormgeving

Marieke Eijt, gaw ontwerp+communicatie b.v., Wageningen

druk

Drukkerij Modern, Bennekom

rapportnummer

2022-40

isbn/ean

XXX

Dit is de Nederlandstalige samenvatting van het proefschrift *'Ageing of plastic pipes in urban drainage systems'*. Waarop Konstantinos Makris aan de TU Delft promoveert. Om bij te dragen aan een doelmatig rioolbeheer zijn de verouderingen en faalmechanismen van kunststofleidingen bestudeerd. Daarnaast is onderzocht of de niet-destructieve vibro-akoestische techniek de fysieke veroudering van kunststofbuizen in reële omstandigheden kan detecteren. De belangrijkste invloed op de levensduur van kunststof (PVC) buizen is menselijk handelen. Makris beveelt aan tot verbeterde protocollen en strenger toezicht op de aanleg van leidingen.

