

Dit is de Nederlandstalige samenvatting van het proefschrift *'Ageing of plastic pipes in urban drainage systems'*. Waaronder Konstantinos Makris aan de TU Delft is gepromoveerd. 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 voor en strenger toezicht op de aanleg van leidingen.

ISBN/EAN 978-90-73645-79-0

Proefschrift Konstantinos Makris vertaald naar de praktijk:

Veroudering van kunststofbuizen in afvalwatersystemen

Proefschrift Konstantinos Makris vertaald naar de praktijk:

Veroudering van kunststofbuizen in afvalwatersystemen

Voorwoord

Deze samenvatting beschrijft op hoofdlijnen de resultaten van het promotieonderzoek van Konstantinos Makris naar de veroudering van PVC-riolen. In het volledig, Engelstalige proefschrift *'Ageing of plastic pipes in urban drainage systems'* vindt u de details over alle uitgevoerde analyses, resultaten en de volledige theoretische achtergrond van de vibro-akoestische methode voor verouderingsdetectie. Het proefschrift kunt u downloaden via: <https://repository.tudelft.nl/>

Op verzoek van de rioolbeheerders zocht Konstantinos naar handvatten om de technische restlevensduur van kunststof rioleringen in te schatten. PVC is in principe een heel robuust materiaal met een levensduur van minstens 100 jaar. De praktijk laat echter zien dat PVC-riolen binnen twintig jaar na aanleg afwijken van de beoogde kwaliteit kunnen vertonen. Dit was de aanleiding voor gedetailleerd onderzoek naar de eigenschappen van acht opgegraven PVC buizen om de oorzaken van geconstateerde defecten te achterhalen.

De laboratoriumtesten bevestigden de robuustheid van PVC-leidingen. Ook gaven de resultaten een indicatie dat PVC fysiek verouderd. Het buismateriaal wordt daarbij langzaam minder elastisch en tegelijk iets brosser. Toch laat het onderzoek zien dat onjuiste aanleg, zetting en graafwerkzaamheden veel belangrijkere oorzaken zijn voor beschadigingen en lekkende verbindingen van PVC-buizen, dan de fysieke veroudering an sich. Konstantinos adviseert daarom de behandeling en toezicht bij aanleg van leidingen te verbeteren. Voor vaststelling van de mate van veroudering in de praktijk is de niet-destructieve vibro-akoestische techniek beproefd. Hiermee blijkt fysieke veroudering van volledig met water gevulde kunststofbuizen meetbaar.

Het onderzoek is uitgevoerd binnen het Kennisprogramma Urban Drainage. Dit Kennisprogramma ontwikkelt nieuwe kennis en zorgt voor nieuwe aanwas van ingenieurs en promovendi in het vakgebied stedelijk waterbeheer. Dit onderzoek was mogelijk door gezamenlijke financiering vanuit de sector en wetenschappelijke begeleiding door de leerstoel Sanitary Engineering (riolering) van de TU Delft. Beiden zijn nodig om het hoofd te bieden aan de uitdagingen waarvoor de sector staat. Denk hierbij aan klimaatverandering, doelmatigheid, hergebruik, verantwoording en transparantie, verouderende infrastructuur en het vinden van kwalitatief hoogwaardig personeel.

Wij wensen u veel leesplezier en inspiratie toe.

Hilde Niezen, Stichting RIONED
Joost Buntsma, STOWA
April 2023

Inhoud

1 Inleiding	7
1.1 Achtergrond en aanleiding	7
1.2 Doel van het onderzoek	8
1.3 Leeswijzer	8
2 Deelonderzoek 1: Veroudering van PVC-rioolbuizen	9
2.1 Onderzoeksdoel	9
2.2 Literatuuronderzoek naar veroudering van PVC-buizen	9
2.3 Onderzoek schadebeelden PVC-buizen in de Nederlandse praktijk	9
3 Deelonderzoek 2: Detailonderzoek 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 waargenomen toestandsaspecten	15
4 Deelonderzoek 3: 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 Deelonderzoek 1: Veroudering van PVC-rioolbuizen: de literatuur versus de praktijk	23
5.2 Deelonderzoek 2: Faalfactoren van PVC-rioolbuizen	23
5.3 Deelonderzoek 3: Vibro-akoestiek voor verouderingsdetectie van kunststofbuizen	24
5.4 Aanbevelingen en uitdagingen	24
Literatuur	25
Dankwoord	27
Colofon	27

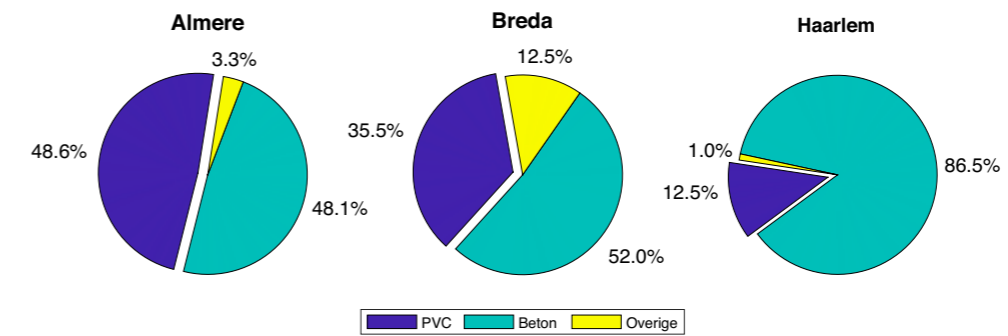
1 Inleiding

Dit is de naar de Nederlandse rioleringspraktijk vertaalde samenvatting van het proefschrift geschreven door Konstantinos Makris met de titel "Ageing of plastic pipes in urban drainage systems" bij TU Delft Sanitary Engineering. Dit onderzoek had als doel rioolbeheerders handvatten te geven voor inschatting van de veroudering van kunststofbuizen en daarmee bij te dragen aan doelmatig beheer van kunststof buizen.

1.1 Achtergrond en aanleiding

Afvalwatersystemen zijn een kapitaalintensieve infrastructuur. Tijdens de gebruiksfase ondergaat riolering veroudering. De veroudering leidt op termijn onder meer tot lekkage, constructieve instabiliteit en verlies aan hydraulische capaciteit. Kennis van de constructieve sterkte en stabiliteit voor een inschatting van de restlevensduur zijn essentieel voor het doelmatig beheer van deze systemen. Vrijwel alle rioolbeheerders gebruiken voornamelijk visuele inspecties voor een indruk van de leidingconditie, zodat zij alleen zichtbare gebreken constateren. Niet-zichtbare materiaalveroudering van kunststof leidingen komt met visuele inspectie vanzelfsprekend niet in beeld. Vooral voor PVC-leidingen, de 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 vrijerval 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 Haarlem bestaat een relatief klein deel uit PVC, terwijl Breda meer variatie in gebruikte materialen kent.



Figuur 1.1
Verdeling leidingmaterialen in Almere, Breda en Haarlem

1.2 Doel van het onderzoek

De levensduur van een kunststofbuis is beïnvloed door factoren uit zowel de productie-, installatie- als de exploitatiefase. Deze factoren hebben een wisselwerking op elkaar, waardoor verschillende faalmechanismen ontstaan. Het hoofddoel van dit onderzoek 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 een niet-destructieve inspectiemethode te ontwikkelen voor de beoordeling van de toestand van ondergrondse rioolbuizen. Vanwege het veelvuldig gebruik van PVC voor rioolbuizen, lag de focus op de veroudering van PVC-buizen. De ontwikkelde inspectiemethode is echter ook te gebruiken bij andere kunststoffen.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bevat een kritische beoordeling van de theoretische levensduur van PVC-rioolbuizen in internationale wetenschappelijke literatuur en de praktische levensduur via de analyse van inspectiegegevens.

Hoofdstuk 3 geeft mogelijke verklaringen voor het verschil tussen de theoretische en werkelijke levensduur 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 meten 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 Deelonderzoek 1: Veroudering van PVC-rioolbuizen

Alle materialen gebruikt in riolering verouderen. In dit onderzoek verkende Konstantinos Makris welke eigenschappen van PVC veranderen bij veroudering van PVC-riolen.

2.1 Onderzoekdoel

Het doel van deelonderzoek 1 was een verkenning van relevante aspecten bij de veroudering van PVC buizen. Dit is allereerst onderzocht met een uitgebreid literatuuronderzoek en daarna met een analyse van inspectieresultaten van PVC buizen in Nederland. De inspectiegegevens zijn afkomstig van vier verschillende gemeenten in Nederland: Almere, Amstelveen, Breda en Haarlem.

2.2 Literatuuronderzoek naar veroudering van PVC-buizen

Uit de internationale literatuur komt het beeld naar voren dat PVC een heel robuust materiaal is met een algemeen aangenomen theoretische levensduur van meer dan 100 jaar. Specifiek komt naar voren dat:

- PVC een zeer bestendig materiaal is voor leidingsystemen zonder indicaties van verslechterende fysieke of mechanische eigenschappen (Bauer, 1990; Alferink et al. 1995; Whittle en Tennakoon, 2005; Folkman, 2014);
- de PVC-samenstelling geen aanzienlijke chemische verandering ondergaat door de gewoonlijk in riolen aanwezige chemicaliën zoals zwavelzuur, natriumsulfaat, natriumhydroxide, natriumhypochloriet, chloordioxide; (Bishop, 1990; Hawkins en Mass, 1994; Fumire 2008; Lasfar et al., 2014);
- de buisverbindingen intact blijven - zelfs wanneer ze onderhevig zijn aan overmatige deformatie - en lekkage door de buiswand niet of nauwelijks optreedt.

Meer details over veroudering van PVC-rioolbuizen vanuit wereldwijd gepubliceerde literatuur staan in Makris et al. (2020).

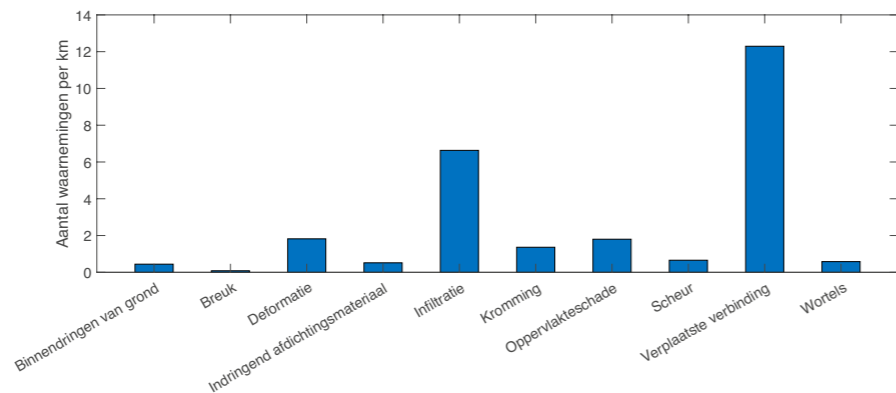
2.3 Onderzoek schadebeelden PVC-buizen in de Nederlandse praktijk

Uit inspectiegegevens van drie Nederlandse gemeenten (Almere, Breda, Haarlem) blijkt dat in de praktijk wel degelijk afwijkingen van de gewenste toestand zijn geconstateerd. Volgens de normen voor toestandsclassificatie (NEN 13508-2 en vroeger NEN 3399) noemen we deze afwijkingen waarnemingen of defecten, zonder daarbij een uitspraak te doen over de noodzaak tot ingrijpen. Vanwege de onzekerheid in classificatie van CCTV-inspecties (Dirksen et al., 2013), is in voorliggend onderzoek geen rekening gehouden met de classificatie (ernst) van de waarnemingen. Verder geldt dat sommige waarnemingen (zoals kleine hoekverdraaiing of deformaties) door het elastisch gedrag van kunststof weinig invloed hebben op de verwachte levensduur.

Figuur 2.1 geeft de frequentie aan van de in PVC-buizen van Almere, Breda en Haarlem waargenomen toestandsaspecten volgens NEN 3399.

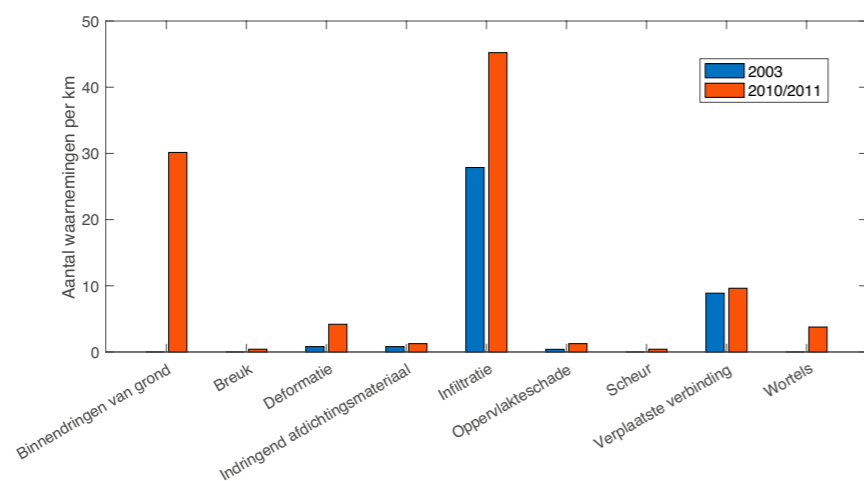
Figuur 2.1 Aantal waarnemingen per kilometer op basis van CCTV-inspecties voor PVC-rioolbuizen van drie Nederlandse gemeenten: Almere, Breda en Haarlem.

Figuur 2.1
Aantal waarnemingen 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. Deze gemeente beschikt over inspectiebeelden van buizen die binnen zeven tot acht jaar twee keer zijn geïnspecteerd. Met vergelijking van de inspectiebeelden is de veroudering van PVC-systemen onderzocht. Uit deze analyse (zie figuur 2.2) blijkt dat bij de tweede inspectie waarnemingen vaker voorkomen en dat er ook nieuwe defecten optreden (breuken, scheuren, wortelingroei).

Figuur 2.2
Aantal waarnemingen 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).



In de literatuur zijn ook voorbeelden beschikbaar van inspecties van PVC leidingen. Kuliczkowska et al. (2016) presenteerde een reeks waarnemingen in nieuw geïnstalleerde PVC-rioolbuizen zoals deuken als gevolg van installatie of bodemverdichting, overmatige vervormingen en onjuiste longitudinale hellingen. Inspectiegegevens uit Almere, Breda en Haarlem geven aan dat nog andere defecten kunnen ontstaan: oppervlakteschade, scheuren, verplaatste verbindingen, indringend afdichtingsmateriaal, wortelingroei en breuken.

Bovenstaande paragrafen duiden op een verschil tussen internationaal wetenschappelijk onderzoek en waarnemingen in de Nederlandse praktijk. Bevindingen in de literatuur hebben geleid tot een algemeen aangenomen theoretische levensduur van meer dan 100 jaar, terwijl een verkenning van inspectiegegevens aangeeft dat binnen enkele decennia veelvuldig waarnemingen of defecten optreden. Het grootste verschil is waargenomen in de conditie van de 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 waargenomen lekkages bij Nederlandse inspectiebeelden (figuren 2.1 en 2.2). De Nederlandse beelden komen overeen met de resultaten van CCTV-inspecties die zijn gepubliceerd voor Zweden (Stål, 1998) en Denemarken (Randrup, 2000).

3 Deelonderzoek 2: Detailonderzoek naar de faalfactoren van PVC-rioolbuizen

3.1 Onderzoeksdoel

Dit hoofdstuk probeert het verschil tussen wetenschappelijk onderzoek en observaties in de praktijk te verklaren door de (materiaal)eigenschappen van acht opgegraven PVC-rioolbuizen met bekende defecten in detail te onderzoeken. De resultaten van uitgebreide materiaaltests kunnen eventuele veroudering van het materiaal aangeven en een verklaring zijn voor de waargenomen toestandsaspecten.

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 steeds ongeveer één meter onaangetast materiaal naast het deel van de buis met een waarneming. Eén nieuwe buis is gebruikt als referentie. Bij de interpretatie van de resultaten is rekening gehouden met de afgelopen decennia doorgevoerde veranderingen in het productieproces. 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

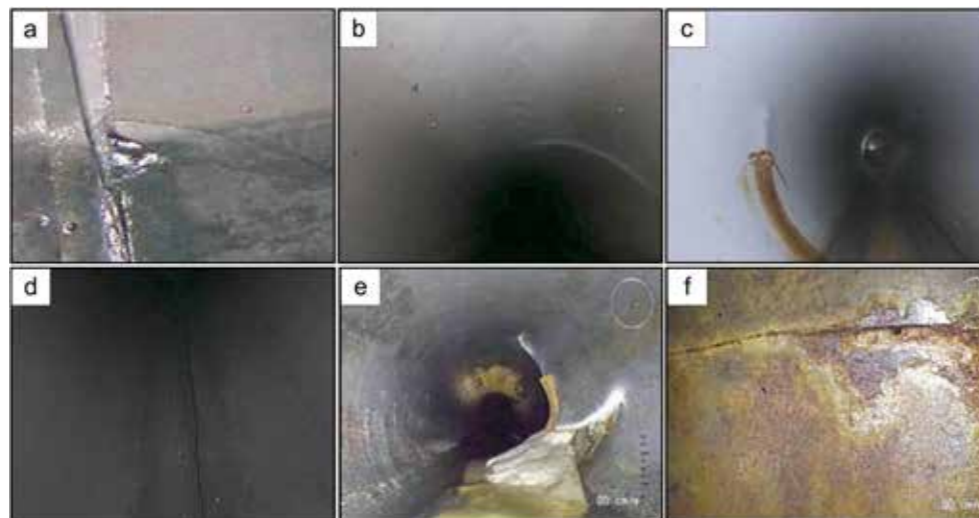
Buizen A-3 en A-4 hebben een geconstrueerde wand met een aantal kanalen parallel aan de as van de buis (zie figuur 3.1), terwijl buizen B-3 en B-4 respectievelijk een kern van gerecycled en geschuimd PVC hebben. De rest van de buizen zijn gemaakt van een enkele PVC-laag.



Figuur 3.1
PVC-buis met een met langskanalen geconstrueerde wand

Figuur 3.2 toont inspectiebeelden van de buizen met een constructief defect. Het defect van buizen B-1 en B-4 was wortelingroei via de buisverbindingen. De kwaliteit van deze buisverbindingen is niet meegenomen in het huidige onderzoek. Deze buizen hadden verder geen enkel zichtbaar 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 3.2
CCTV of Panoramio® beelden van opgegraven leidingen:
a) Buis A-1 (DN 250, 43 jaar oud) met scheur bij de aansluiting.
b) Buis A-2 (DN 250, 42 jaar oud) met vervormde bovenkant.
c) Buis A-3 (DN 250, 41 jaar oud) met puntige breuk aan de zijkant.
d) Buis A-4 (DN 250, 39 jaar oud) met scheur aan de onderkant.
e) Buis B-2 (DN 250, 39 jaar oud) met breuk.
f) Buis B-3 (DN 200, 23 jaar oud) met gecompliceerde scheur.



De uitgevoerde tests en analyses op het buismateriaal omvatten:

- de bepaling van dichtheid en intrinsieke viscositeit,
- differentiële scanningcalorimetrie,
- thermo-gravimetrische analyse,
- fouriertransformatie infraroodspectroscopie,
- dispersieve röntgenfluorescentie,
- scanning-elektronenmicroscopie en
- trek- en buigtests.

Deze analyses hadden de volgende doelen:

- aanwijzingen voor materiaalkristallisatie,
- karakterisering van de moleculaire structuur,
- bepaling van de thermische eigenschappen (bijv. glas- en ontledingstemperatuur),
- detectie van eventuele veranderingen in carbonyl- en hydroxylfunctionele groepen,
- identificatie van de elementaire compositie (stabilisatoren, vulstoffen, pigmenten),
- bestudering van de materiaalmicrostructuur en
- bepaling van de mechanische eigenschappen van het materiaal (de trek- en buigsterkte, de rek bij breuk en de elasticiteitsmodulus).

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

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 3.4) en langzaam uit elkaar getrokken. De uitgeoefende trekspanning wordt gemeten met een krachtmeetcel, en de verlenging van het monster met een extensiemeter.

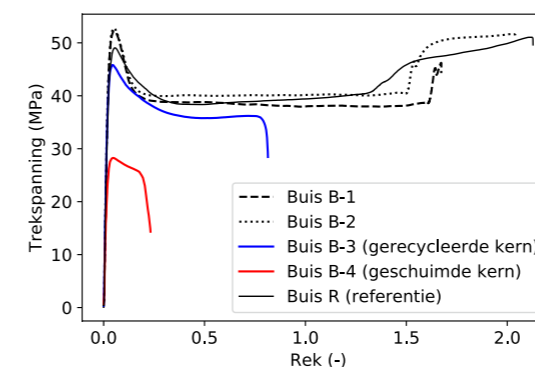
Wat is een buigproef?

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.

3.3 Resultaten

De resultaten van de uitgebreide testen brachten aan het licht welke materiaaleigenschappen veroudering laten zien en in welke mate. Deze samenvatting legt de nadruk 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).

De trekproeven (figuur 3.3) lieten een variabiliteit tussen de verschillende typen buizen zien in vergelijking met de onlangs geproduceerde referentiebus. Veranderingen in het productieproces in de afgelopen 40 jaar kunnen de gevonden verschillen wellicht deels verklaren. De enkellaagse PVC-buizen vertoonden een toename van de maximale sterkte en elasticiteitsmodulus, en een afname van de rek bij breuk. Niettemin bleef de rek bij breuk hoog. De buis met een kern van gerecycled PVC had een gemiddelde trekspanning vergelijkbaar met de referentiebus, hoewel de breuk eerder optrad. De buis met een kern van geschuimd PVC vertoonde de laagste waarden van ultieme spanning en rek bij breuk.



Figuur 3.3
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. Verplaatsings-snelheid = 5 mm/min. Testtemperatuur = 24 ± 2 oC).

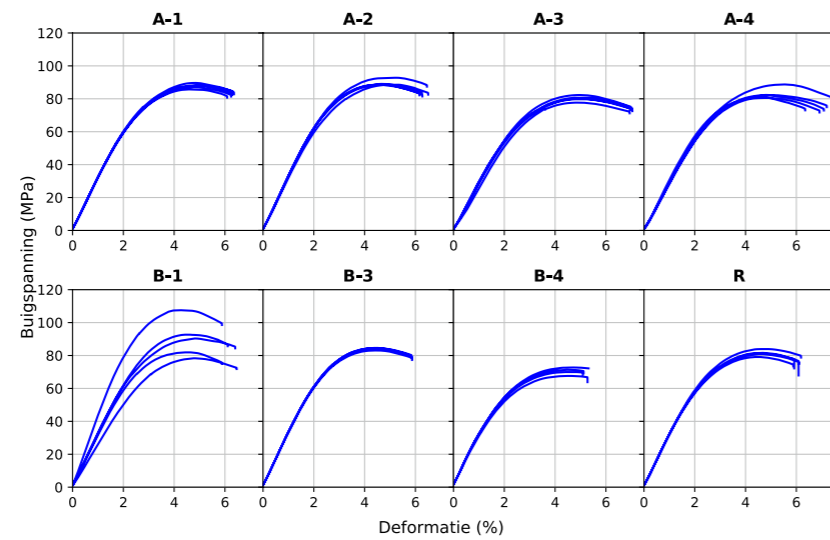
Figuur 3.4 laat twee geteste monsters zien die uit de opgegraven buizen zijn gefreesd: een monster van de enkellaagse buis (links) en een monster van de buis met de kern van geschuimd PVC (rechts). De hogere rek lengte van de enkellaagse buizen bij trekvervormingen is duidelijk zichtbaar.



Figuur 3.4
Trekproef op monsters die uit de opgegraven buizen zijn gefreesd: enkellaagse buis (links) en buis met een kern van geschuimd PVC (rechts).

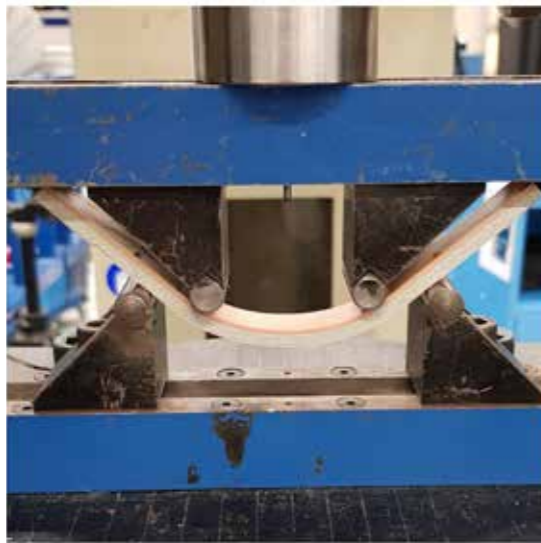
Bij de buigtesten werd hetzelfde patroon als bij trekproeven teruggevonden voor enkellaagse buizen, waarbij oudere buizen hogere waarden voor de ultieme buigsterkte en buigmodulus vertoonden (zie figuur 3.5). Een opvallend resultaat is de variabiliteit bij monsters die uit dezelfde buis kwamen, vooral bij buis B-1.

Figuur 3.5
Buigspannings-
deformatiediagram van
4-punts buigtests op vijf
verschillende proefstukken
per buis. Verplaatsings-
nelheid = 15 mm/min (B-3:
verplaatsingsnelheid = 14
mm/min, B-4: verplaatsings-
nelheid = 11 mm/min).
Testtemperatuur = 20 ± 0,2 oC.



Figuur 3.6 toont de buigtest van een monster met een geschuimde kern. Dit type buis kan wel veel buigvervorming verdragen, in tegenstelling tot de lagere waarden in de trekproeven.

Figuur 3.6
Buigtest op één monster uit
een buis met een kern van
geschuimd PVC (buis B-4)

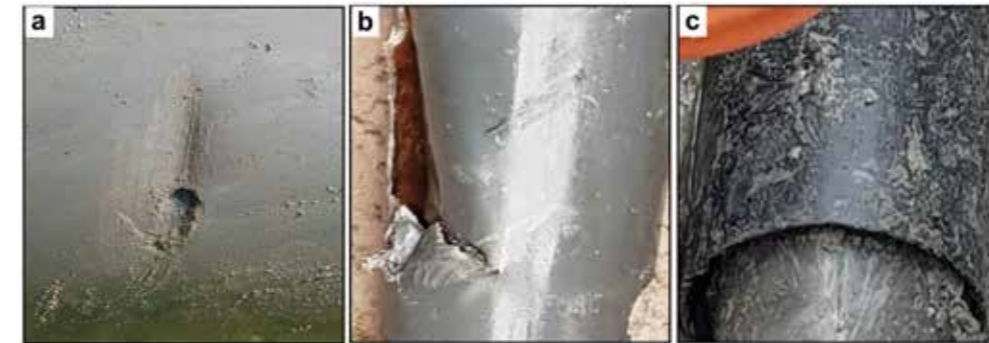


3.4 Oorzaken van de waargenomen toestandsaspecten

De verkenning van de materiaaleigenschappen leverde veel informatie op over de structurele integriteit van de geteste buizen. Daaruit bleek dat de bij visuele inspectie gedane waarnemingen niet zozeer komen door materiaalveroudering, maar ontstaan tijdens de aanleg of door werkzaamheden van derden:

- Buis A-1: Doorbuiging van de verbinding leidde tot de storingsoorzaak van buis A-1. Inspectiebeelden gaven duidelijk de hoekverdraaiing bij de verbinding aan (figuur 3.2a), 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 ongelijkmatige 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 is geen scherp voorwerp (bijv. steen) gevonden in contact met buis A-3 nabij de breuk, terwijl diepe krassen werden waargenomen in het vervormde gebied naast het defect (zie figuur 3.7a). Hierdoor wordt aangenomen dat deze waarneming waarschijnlijk is aan te merken als 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 mogelijk 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-uurpositie 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 een graafmachine zichtbaar was op de buis (figuur 3.7b). Wellicht is dit defect ontstaan tijdens graafwerkzaamheden bij de aanleg van nabijgelegen leidingen
- Buis B-3: De faaloorzaak van buis B-3 is duidelijk gebrekkige installatie, waarbij de leiding was afgedekt met een extra stuk leiding (figuur 3.7c). 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 constructief defect.



Figuur 3.7
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 installatie-
kwaliteit.

4 Deelonderzoek 3: Vibro-akoestiek voor verouderingsdetectie van kunststofbuizen

Door materiaalveroudering wordt de kunststofbuis stijver en brosser. 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. 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).

4.1 Onderzoeksdoel

Beproeving van de vibro-akoestische meetmethode voor de opslagmodulus 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:

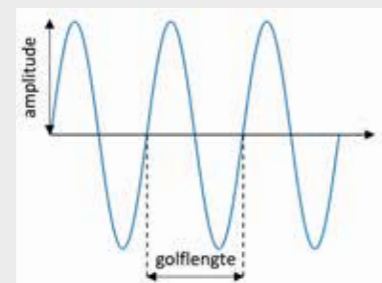
$$x(t) = A \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (\text{Vergelijking 4.1})$$

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 golfgetalen 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_z) en andere parameters van het systeem:

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

Drie soorten (axisymmetrische) golven planten zich bij lage frequenties voort in een met water gevulde buis:

- de longitudinale golf (plant zich voort door de buiswand in langsrichting van de buis)
- de torsiegolf (plant zich voort door de buiswand langs de omtrek van de buis)
- de watergedragen golf.

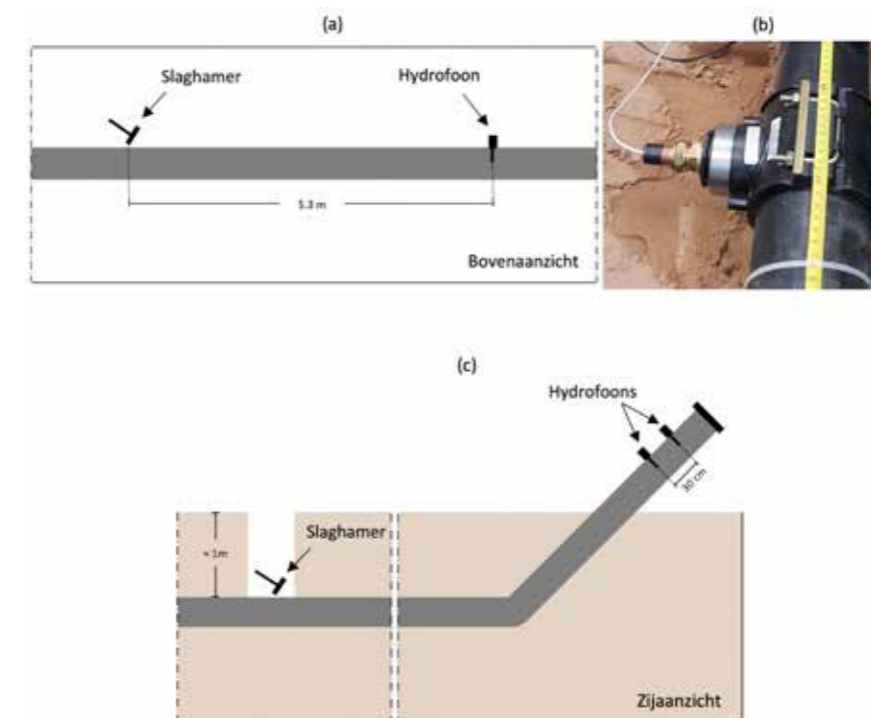
De watergedragen golf plant zich voort in het water maar bevat ook informatie over de buis. Als de buis in de grond ligt, kan alleen de watergedragen golf zich voortplanten.

Vanwege dit effect moet voor de test de buis volledig gevuld zijn met water.

De volledige, theoretische achtergronden van de methode staan in het (Engelstalige) proefschrift.

4.2 Materiaal en methoden

De vibro-akoestische methode is in het laboratorium getest 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 (start van de golf) werd bereikt met een slaghamer en het voortplantingssignaal werd opgenomen met hydrofoons (onder water microfoons). Figuur 4.2 toont de twee opstellingen en de montage 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 was in opstelling B niet direct meetbaar 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 nodig voor de signaalanalyse.



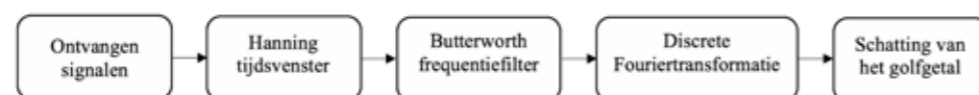
Figuur 4.2 Een illustratie van de experimentele opstellingen (a, c), inclusief het punt van excitatie via de slaghamer, en de locatie van de hydrofoons. De montage van de hydrofoons in de buizen wordt ook getoond (b).

Tabel 4.1 toont de waarden van de eigenschappen van het gebruikte buismateriaal, het water en de grond. De onzekerheden (standaard deviatie) van deze parameters zijn ook gegeven. De dichtheid van het buismateriaal is bepaald volgens ISO 1183-1 (immersiemethode) en was $957,6 \text{ kg/m}^3$ met een 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 golf 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 watergedragen golf te isoleren van andere golven (bijvoorbeeld door reflecties). Zie voor meer uitleg het kader op de volgende pagina. 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?

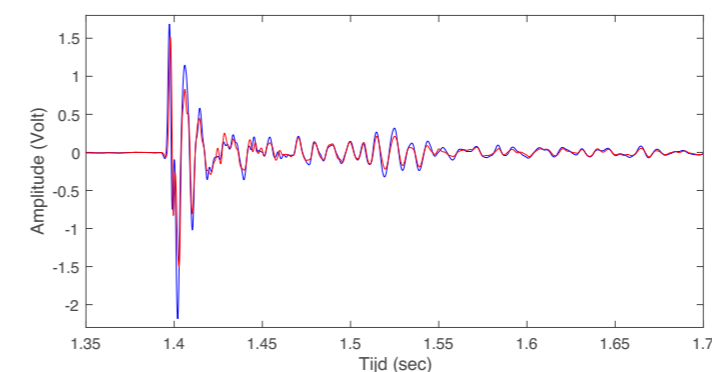
Een tijdsvenster is een wiskundige functie die nul is buiten een bepaald interval. Het is meestal symmetrisch rond het midden van het interval waar het maximum is. Een tijdsvenster wordt vermenigvuldigd met een signaal om een nieuw signaal te genereren dat ook nul is buiten het gekozen interval.

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.

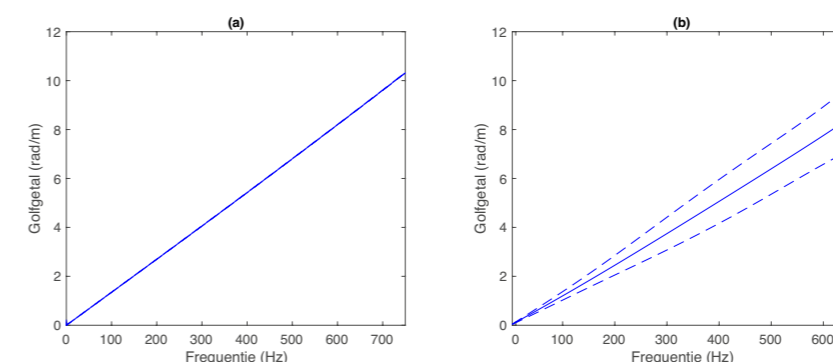
4.3 Resultaten

Figuur 4.4 geeft een voorbeeld van de onbewerkte signalen van de twee hydrofoons in opstelling B.



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

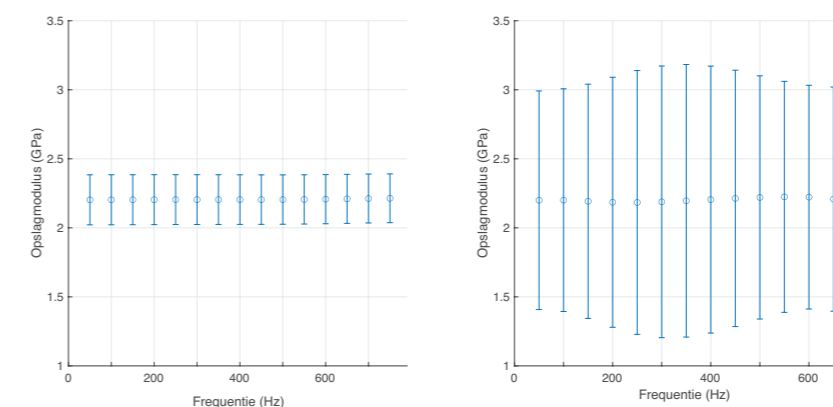
De toepassing van de signaalanalyse (figuur 4.3) geeft het golfgetal van de watergedragen golf voor opstelling A (figuur 4.5a) en opstelling B (figuur 4.5b) ten opzichte van trillingsfrequentie. Afhankelijk van de opstelling wordt een ander frequentiebereik bereikt waarbij de resultaten consistent zijn ($0 - 750 \text{ Hz}$ 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 $2,2 \text{ GPa}$ 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.

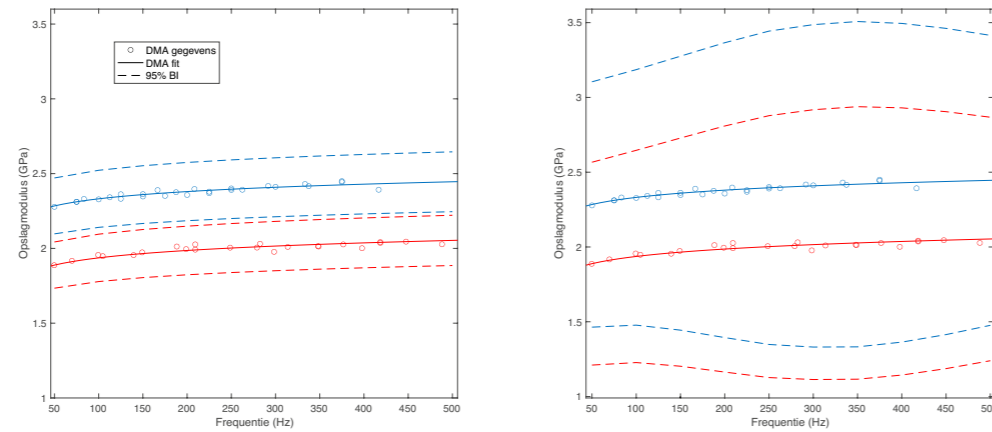
De testen met de vibro-akoestiekmethodiek geven twee conclusies:

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 conclusie blijkt uit consistente resultaten geven voor de opslagmodulus, ongeacht het omringende medium bij de vibro-akoestische experimenten (figuur 4.6).

De tweede conclusie blijkt uit onderzoek van 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 als alternatief voor vibro-akoestiek de opslagmodulus bepaalt als functie van de trillingsfrequentie. De resultaten van DMA zijn 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 voor een 3 jaar oude buis (rood) en een 44 jaar oude buis (blauw). 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) onderzoekt 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)

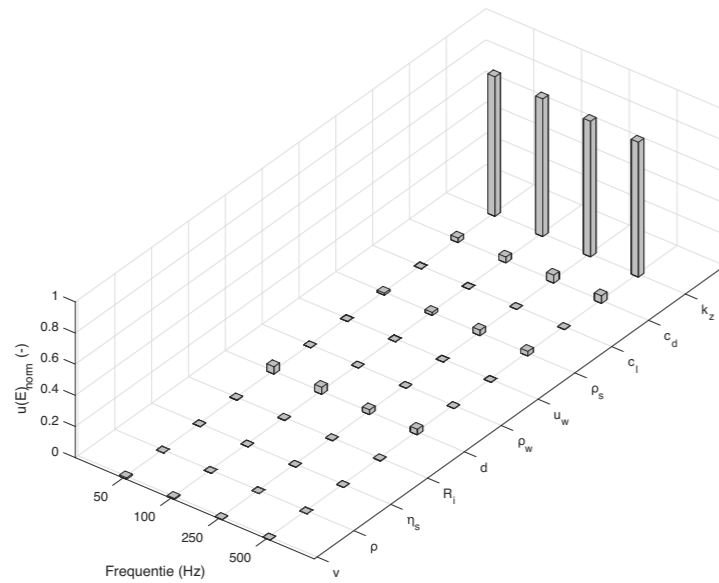
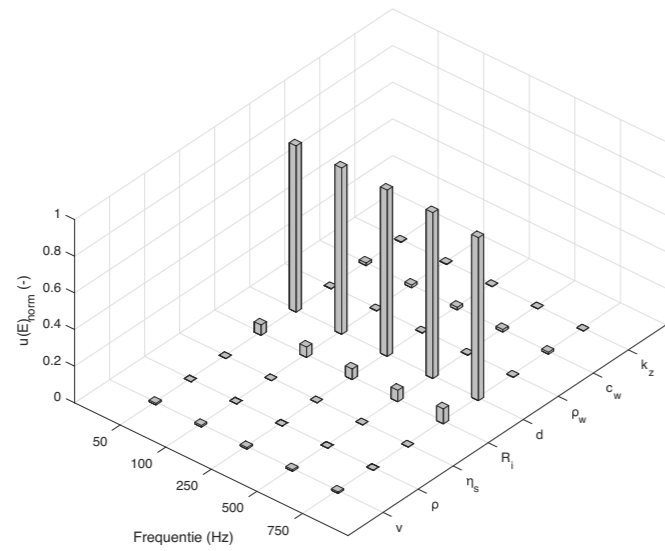
Waarbij $u(E)_{(x_i)}$ de onzekerheid in de opslagmodulus is die wordt veroorzaakt door de individuele onzekerheid van parameter x_i bij een bepaalde frequentie, en N het totale aantal parameters is.

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 (bovenste figuur) en opstelling B (onderste figuur).

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 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 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 (ν : Poisson-factor van de buis, ρ : buisdichtheid, η_s : buisverliesfactor, R_i : interne straal van de buis, d : wanddikte van de buis, ρ_w : waterdichtheid, c_f : geluidsgolfsnelheid van water, ρ_s : bodemdichtheid, c_d : compressiegolfsnelheid van de bodem, c_1 : schuifgolfsnelheid van de bodem, k_z : axiaal golfgetal).



5 Conclusies en aanbevelingen

Het onderzoek van Konstantinos Makris geeft onderstaande conclusies en aanbevelingen.

5.1 Deelonderzoek 1: Veroudering van PVC-rioolbuizen: de literatuur versus de praktijk

In de praktijk geconstateerde waarnemingen bij visuele inspecties van PVC-riolen laten zich niet rijmen noch verklaren met de kennis vanuit de wetenschappelijke literatuur over veroudering van PVC-leidingen.

Internationale literatuur:

- Onderzoek naar de fysische en mechanische eigenschappen van PVC-buizen toont aan dat PVC op zichzelf een zeer robuust 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 buisverbindingen veroorzaken lekkages.
- Deze bevindingen hebben geleid tot een algemeen aangenomen theoretische levensduur van meer dan 100 jaar.

In de praktijk:

- Uit inspectiegegevens blijken diverse afwijkingen in de waargenomen toestand ten opzichte van de gewenste toestand. Deze afwijkingen ten opzichte van nieuw aanleg beïnvloeden de constructieve stabiliteit, de hydraulische capaciteit en/of de lektheid van het rioolsysteem.
- De aantallen defecten kunnen onder bepaalde omstandigheden (bijv. in een zettingsgevoelig gebied) relatief snel toenemen.
- Lekkende buisverbindingen vormen het grootste aandeel in de defecten.

5.2 Deelonderzoek 2: veroudering van PVC-rioolbuizen

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

- De belangrijkste verouderingsoorzaken zijn fouten in de aanleg en graafwerkzaamheden in de directe omgeving van de buizen.
- Er is een grote heterogeniteit in het aantal en de soorten anorganische elementen in de samenstelling van verschillende PVC-buizen. Verschillen in eigenschappen tussen buizen kunnen mede voortkomen uit deze heterogeniteit.
- Bij het materiaal uit de opgegraven PVC-rioolbuizen blijkt fysieke veroudering op te treden. Fysieke veroudering van het materiaal is echter geen verklaring voor de waarnemingen bij visuele inspectie.
- De beperkte aanwijzingen voor chemische degradatie zijn beperkt 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 drielaagsbuizen (met een kern van gerecycled of geschuimd PVC) hebben aangetoond dat gelaagde buiswandconstructies minder sterk zijn dan volwandige PVC-rioolbuizen.

5.3 Deelonderzoek 3: Vibro-akoestiek voor verouderingsdetectie van kunststofbuizen

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

- Toepassing van de methode is eenvoudig. Een slaghamer wekt de golf op en twee hydrofoons nemen het voortplantingssignaal op.
- Als de buis in de grond ligt, kan alleen een watergedragen golf zich voortplanten. Daarom moet de tijdens de test de buis volledig gevuld zijn met water.
- Ongeacht het medium dat de buis omringt (lucht of grond), moet de afstand tussen de meetpunten van de opnamesignalen zo groot mogelijk zijn.
- Het gebruik van lagere geluidsfrequenties is gunstig omdat het de gevoeligheid voor veroudering verhoogt en het de analyse vereenvoudigt.
- De wanddikte en de interne straal van de buis moeten nauwkeurig bekend zijn.
- De bodemeigenschappen zijn wel relevant, maar geven niet de grootste bijdrage aan de onzekerheid.

5.4 Aanbevelingen en uitdagingen

Algemeen

- De belangrijkste factor op de levensduur van kunststof (PVC) buizen 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), kan ook een afwijking opleveren in de schatting van de opslagmodulus van het buismateriaal.
- 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).
- Verder onderzoek naar de voorgestelde vibro-akoestische methode is gunstig voor een succesvolle toepassing in de praktijk. De toepasbaarheid kan verder worden getest in een systeem met verbindingen of met huisaansluitingen (met verschillende mate van insteken in de hoofdbuis).
- De toevoeging van meer sensoren (zoals hydrofoons) zou leiden tot een betere scheiding van verschillende voortplantingsmodi en het meten van golfdemping.
- Buisverbindingen hebben de hoogste defectpercentages in de beschikbare inspectiegegevens van riolering. Naast goede 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 op de verbindingmaterialen.

Rioolbeheerders

- PVC-buizen zijn de meest gebruikte kunststof vrijvervalriolen in Nederland. Hun chemische resistentie is bekend en ook bevestigd door dit onderzoek. PVC-buizen zijn in de onderzochte inspectiedatabases geregistreerd als "PVC" zonder nadere aanduiding van de verschillende buissamenstellingen (bijvoorbeeld drielaags met een interne kern). In dit onderzoek bleken de acht opgegraven rioolbuizen vier verschillende soorten PVC-buizen: enkellaags, drielaags met een gerecyclede kern, met een geschuimde kern en met een lege kern (kanalen). Kennis van de soort aangelegde buis is belangrijk, want de mechanische eigenschappen variëren 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.
- //Oudere PVC-buizen zijn stijver en brosser. Tijdens werkzaamheden zoals inspectie en reiniging of bij hergebruik van kunststofbuizen kunnen brosse buizen makkelijker kapot gaan. Daarom is informatie over de mate van veroudering van het buismateriaal belangrijk.

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/uid: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 Lilge, D. (2003). Mechanical creep 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.

Colofon

STOWA en Stichting RIONED in het kort

Stichting RIONED is de koepelorganisatie voor stedelijkwaterbeheer in Nederland. Wij zijn er voor en door alle relevante overheden en bedrijven. Inspelend op nieuwe opgaven en mogelijkheden komen wij op voor het belang van stedelijk waterbeheer: goed zorgen voor afval-, hemel- en grondwater in de steden en dorpen. Stichting RIONED bevordert innovatie, nieuwe kennis en verspreiding van kennis. Wij begrijpen en ondersteunen de vakwereld. 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 Rioleringsstechnieken, KWR Watercycle Research Institute, Royal HaskoningDHV, Stichting RIONED, STOWA, Sweco, 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.

© 2023 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's

Konstantinos Makris (Technische Uniersiteit Delft)

vormgeving

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

druk

Drukkerij Modern, Bennekom

rapportnummer

2022-40

isbn/ean

978-90-73645-79-0