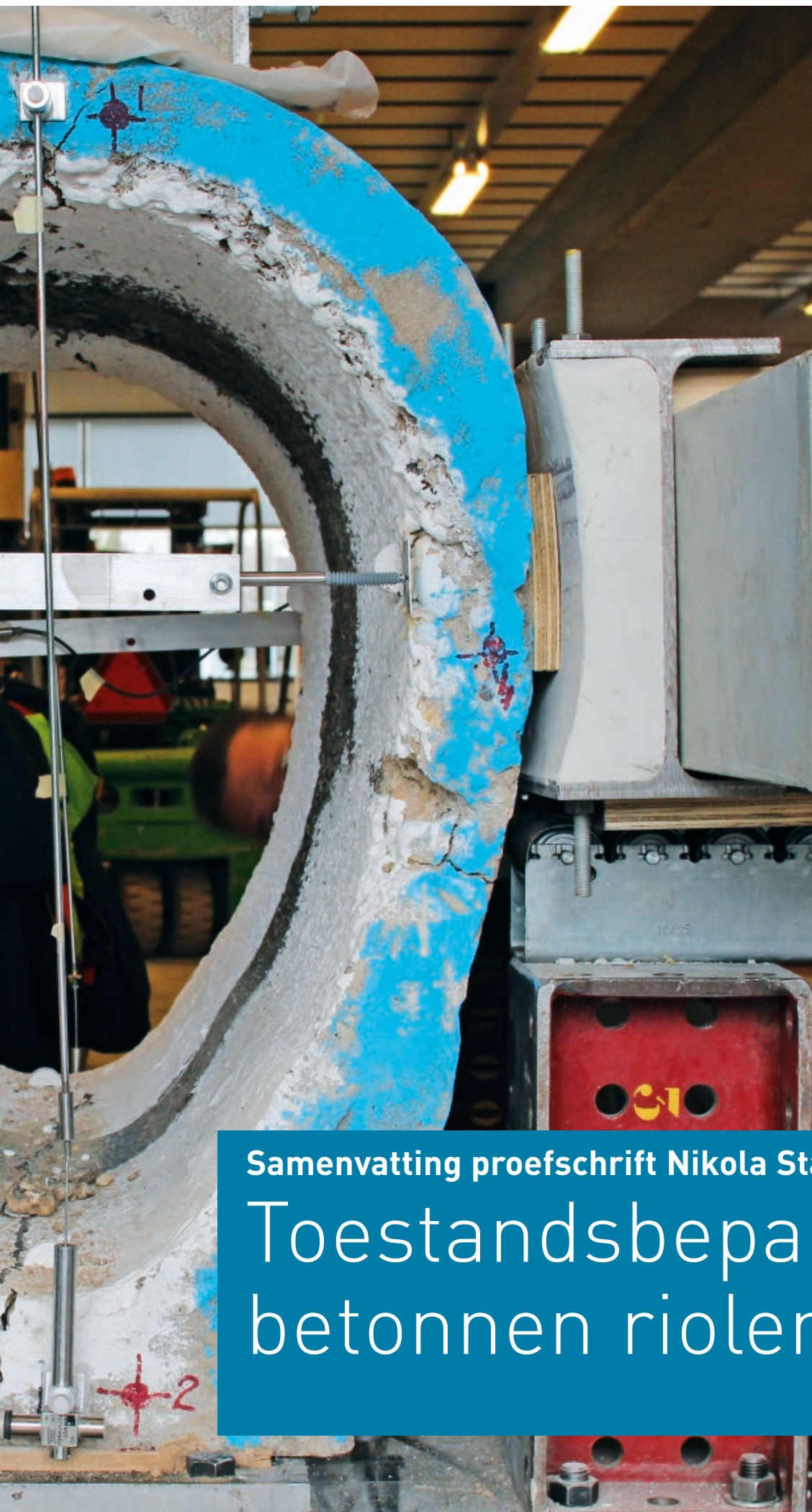




stowa
Stichting
RIONED

Samenvatting proefschrift Nikola Stanić

Toestandsbepaling betonnen riolen

Toestandsbepaling betonnen riolen

Samenvatting proefschrift Nikola Stanić

Voorwoord

Dit is de Nederlandstalige samenvatting van het proefschrift *Assessment methods for structural and hydraulic properties of concrete pipes* van Nikola Stanić. Met zijn promotie op 26 januari 2016 is Stanić de eerste promovendus uit het Kennisprogramma Urban Drainage.

Het Kennisprogramma Urban Drainage is in 2010 gestart om de leerstoel riolering aan de TU Delft te versterken. Naast het ontwikkelen van nieuwe kennis moet het zorgen voor voldoende nieuwe aanwas van ingenieurs en promovendi op het vakgebied riolering. 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.

In de eerste vijf jaar van het kennisprogramma stonden vier thema's centraal:

- assetmanagement met accent op rioolvervanging;
- assetmanagement met accent op operationeel beheer;
- inzicht in dynamisch functioneren van afvalwatersystemen;
- waterketen van de toekomst en nieuwe sanitatie.

Op alle thema's zijn promovendi aan de slag gegaan om te werken aan wetenschappelijke ontwikkeling en innovaties. Om de ontwikkelde kennis binnen de sector zo goed mogelijk te delen, hebben Stichting RIONED en STOWA besloten een Nederlandstalige samenvatting van de proefschriften uit te geven.

François Clemens (hoogleraar riolering TU Delft en promotor van Nikola) en Jeroen Langeveld (directeur Kennisprogramma Urban Drainage en copromotor van Nikola) hebben deze samenvatting van het proefschrift van Nikola Stanić geschreven. Hierin staan suggesties voor technieken en methoden waarmee een beheerder de juiste informatie over de toestand van het hoofdriool krijgt om beheer- en vervangingsmaatregelen optimaal in te plannen. De resultaten van dit promotieonderzoek zijn een goede stap op weg naar routinematig onderbouwde uitspraken over de hydraulische capaciteit en de constructieve sterkte van een stelsel. (Het Engelstalige proefschrift van Nikola Stanić is beschikbaar via <http://bit.ly/1KphWPd>)

Wij wensen u veel leesplezier en inspiratie toe.

Hugo Gastkemper, Stichting RIONED
Joost Buntsma, STOWA

Februari 2016

Inhoud

1 Inleiding 7

1.1 Achtergrond en aanleiding 7

1.3 Leeswijzer 8

2 Relatie tussen CCTV-inspectieresultaten en boorkernonderzoek 9

2.1 De praktijk (Den Haag) 9

2.2 Onderzoek consistentie inspectiemethode 9

3 Laserprofilering 12

3.1 De praktijk 12

3.2 Laboratoriumonderzoek meetfoutcorrectie 12

3.3 Onderzoeksresultaten 13

4 Meten hydraulische ruwheid 16

4.1 De praktijk 16

4.2 Laboratoriumonderzoek hydraulische ruwheid 16

4.3 Lagere meetresolutie 17

5 Bepalen homogeniteit materiaaleigenschappen 18

5.1 De praktijk 18

5.2 Testopzet belasting rioolbuizen 18

5.3 Testresultaten belasting rioolbuizen 18

5.4 Bepalen materiaaleigenschappen 19

5.5 Aantal monsters voor betrouwbare waarde 21

6 Conclusies en aanbevelingen 22

6.1 Conclusies 22

6.2 Aanbevelingen 22

Dankwoord 23

Literatuur 24

Wetenschappelijke publicaties die uit het onderzoek zijn voortgekomen 25

Colofon 26

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en aanleiding

Rioolstelsels dragen bij aan een goede volksgezondheid en een veilige en prettige leefomgeving. Daarmee vormen zij een essentieel onderdeel van de stedelijke infrastructuur. In Nederland is vrijwel elk huishouden in de stedelijke omgeving aangesloten op de riolering. De gemiddelde leeftijd van de riolering is ongeveer 30 jaar, dat is de helft van de veelgebruikte theoretische levensduur van 60 jaar. Maar een belangrijk deel van de riolering is al ouder dan 30 jaar. Net als bij mensen is de feitelijke leeftijd niet van belang, maar de 'echte' leeftijd wel. Met andere woorden: de huidige conditie van riolen bepaalt welke beheermaatregelen nodig zijn.

Verouderingsprocessen

Zonder rioleringsbeheer zouden onder meer de constructieve sterkte en het hydraulisch functioneren van de stelsels achteruit kunnen gaan. Daarom is het zeer belangrijk inzicht te hebben in de conditie van het riool en in de verouderingsprocessen die deze conditie bepalen. De bekendste verouderingsprocessen zijn:

- verzakking, wat kan leiden tot sedimentophoping, lekkage en grondinspoeling;
- corrosie, wat effect heeft op de hydraulische weerstand en op de constructieve sterkte van met name betonnen buizen.

Onderzoeksmethoden

Traditioneel verzamelen rioleringsbeheerders informatie over de actuele toestand van de riolering via visuele inspectie (CCTV-inspectie; closed-circuit television, ofwel camera-inspectie) en eventueel aanvullende materiaalkwaliteitsmetingen via boorkernonderzoek. Recent onderzoek (*Dirksen et al, 2013*) heeft aangetoond dat inspectieresultaten op basis van CCTV-beelden niet perfect zijn door beperkingen in het menselijk observatievermogen en subjectiviteit bij de interpretatie van de inspectiebeelden. Dit betekent dat met de huidige werkwijze uitspraken als: "de hydraulische afvoercapaciteit van de leiding is 90% van de ontwerpcapaciteit" of "de verhouding tussen de bezwijksterkte en maximaal te verwachten mechanische belasting is 1,5, ofwel een veiligheidsfactor van 1,5" niet mogelijk zijn. Maar zonder een dergelijke kwantificering is het lastig een rationeel besluit te nemen over nut en noodzaak van beheeracties (zoals renovatie of vervanging). De hydraulische capaciteit van een stelsel is wel te meten, maar dat is zeer kostbaar. De constructieve sterkte lijkt vooralsnog alleen te bepalen via destructief onderzoek.

1.2 Onderzoek en proefschrift

Het proefschrift van Nikola Stanić *Assessment Methods for Structural and Hydraulic Properties of Concrete Sewer Pipes* (*Stanić, 2016*) richt zich op niet-destructieve meetmethoden waarmee de in paragraaf 1.1 genoemde uitspraken deels wel mogelijk worden in de nabije toekomst. Omdat ruim 60% van de riolering in Nederland (*RIONED, 2013*) uit (ongewapende) betonnen buizen bestaat, heeft Stanić zich gericht op dit materiaal.

In zijn promotieonderzoek heeft Stanić onder meer de relatie onderzocht tussen de twee veelgebruikte inspectietechnieken: visuele inspectie en boorkernonderzoek. Dit onderzoek vond plaats bij een riool in Den Haag. Vervolgens heeft hij naar een manier gezocht om de onzekerheden in de inspectieresultaten fors te verkleinen. Hiervoor kwam een lasergebaseerde meetmethode in beeld die de interne geometrie van het riool nauwkeurig kan meten.

Lasergebaseerde meettechnieken zijn al in diverse disciplines toegepast, zoals het 3D-laser-scannen van objecten of -inmeten van terreinen of huizen. Het vakgebied riolering gebruikt al enkele jaren onder meer laserprofilering, waarmee de vervorming van kunststof leidingen is te bepalen. Het proefschrift van Nikola Stanić laat zien dat deze techniek met enkele aanpassingen nauwkeurige 3D-beelden levert van de interne geometrie van rioolbuizen. In combinatie met kennis over de materiaalkwaliteit van de buis en eigenschappen van de omringende grond is met deze informatie, theoretisch, iets te zeggen over de constructieve sterkte van een rioolbuis. Met een andere lasermeettechniek – oppervlaktescanning – ontstaat een zeer nauwkeurig 3D-beeld van de buiswand. Hierdoor is de hydraulische ruwheid van de buiswand vast te stellen, wat een belangrijke factor is om de hydraulische afvoercapaciteit te kunnen bepalen.

In dit proefschrift staan suggesties voor technieken en methoden waarmee een beheerder de juiste informatie over de toestand van het hoofdriool kan krijgen om beheer- en vervangingsmaatregelen optimaal in te plannen. Maar er is nog veel onderzoek nodig om routinematig uitspraken te kunnen doen over de hydraulische capaciteit en de constructieve sterkte van een stelsel.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft kort het onderzoek naar de relatie tussen de twee veelgebruikte inspectietechnieken: visuele inspectie en boorkernonderzoek. Dit onderzoek vond plaats bij een riool in Den Haag.

Hoofdstuk 3 gaat in op het laboratoriumonderzoek naar mogelijke aanpassingen in laserprofilering om onzekerheden in rioolinspectieresultaten te verkleinen.

Hoofdstuk 4 gaat over het laboratoriumonderzoek naar de mogelijkheid om op basis van zeer nauwkeurige laserscangegevens van de rioolbuiswand een waarde voor de hydraulische ruwheid te bepalen.

Hoofdstuk 5 behandelt het onderzoek naar de homogeniteit van de materiaaleigenschappen van betonnen rioolbuizen.

Hoofdstuk 6 bevat de conclusies van het promotieonderzoek en aanbevelingen voor verder onderzoek.

2 Relatie tussen CCTV-inspectieresultaten en boorkernonderzoek

2.1 De praktijk (Den Haag)

De meest toegepaste vorm van rioolinspectie is visuele inspectie met video- of CCTV-beelden volgens de Europese norm EN 13508-2 en de NEN 3399. De meeste beheerders nemen een besluit over vervanging of renovatie op basis van informatie over de conditie van een riool die zij via visuele inspectie hebben verkregen. Hierbij gebruiken ze vaak een 'eigen' afwegingskader dat is afgestemd op de lokale omstandigheden (grondsoort, eventuele zettingen of veelvoorkomende schadebeelden) en afwijkt van de beoordelingsrichtlijnen in de NEN 3398. De gemeente Den Haag handelt bijvoorbeeld volgens tabel 2.1 als zij oppervlakteschade (zoals aantasting) of scheuren constateert.

Classificatie op basis van visuele inspectie	1	2	3	4	5
BAF (oppervlakteschade)	–	–	–	boorkernonderzoek	vervanging
BAB (scheurvorming)	–	–	–	vervanging	vervanging

Tabel 2.1 Classificatie schadebeelden en bijbehorende actie

De gemeente vervangt de buis dus bij classificaties 4 of 5 voor scheurvorming (BAB). Hoewel bekend is dat scheurvorming niet altijd direct inhoudt dat de buis mechanisch is bezwaken (zie Stanić *et al*, 2016), voorkomt de gemeente zo wel dat op grote schaal in- of exfiltratie optreedt. Bij oppervlakteschade (BAF) doet de gemeente bij classificatie 4 een boorkernonderzoek en vervangt zij de buis bij classificatie 5.

Boorkernonderzoek

Den Haag onderzoekt de boorkernen op de volgende parameters:

- splijttreksterkte;
- waterabsorptie;
- dichtheid.

Vervolgens krijgen de resultaten een classificatie gebaseerd op de hoogste 'score' in termen van classificatie van de drie genoemde parameters (zie tabel 2.2). Bijvoorbeeld een monster met een splijttreksterkte van 5,5 N/mm² (klasse 2), een waterabsorptie van 8,5% (klasse 2) en een dichtheid van 2.100 kg/m³ (klasse 5) krijgt als totaal de classificatie 'klasse 5'.

	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
Splijttreksterkte [N/mm ²]	> 6	5 - 6	2,6 - 4,9	2,5 - 2	< 2
Waterabsorptie [%]	< 8	8 - 9	9 - 11	11 - 13,5	> 13,5
Dichtheid [kg/m ³]	> 2.275	2.230 - 2.275	2.190 - 2.229	2.150 - 2.229	< 2.150

Tabel 2.2 Classificatie resultaten boorkernonderzoek

In zijn promotieonderzoek heeft Stanić de consistentie van de inspectiemethode in Den Haag nader onderzocht aan de hand van de resultaten van een vervangingsproject in de gemeente.

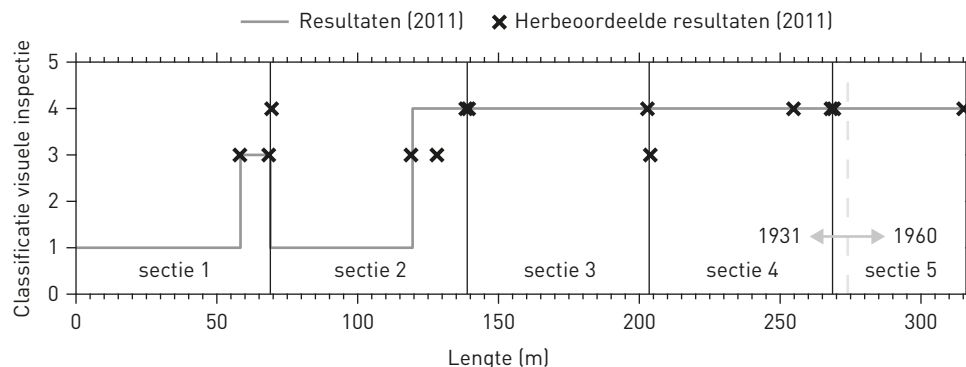
N.B. Het is bekend dat resultaten (classificaties) van visuele inspectie fouten bevatten (zie onder meer Korving, 2004, Korving & Clemens, 2004 en Dirksen *et al*, 2013). Informatie uit boorkernonderzoek kan een nuttige aanvulling op de visuele inspectie zijn, omdat dit meer directe informatie over de materiaaleigenschappen en de resterende wanddikte oplevert (wat niet uit visuele inspectie is af te leiden).

2.2 Onderzoek consistentie inspectiemethode

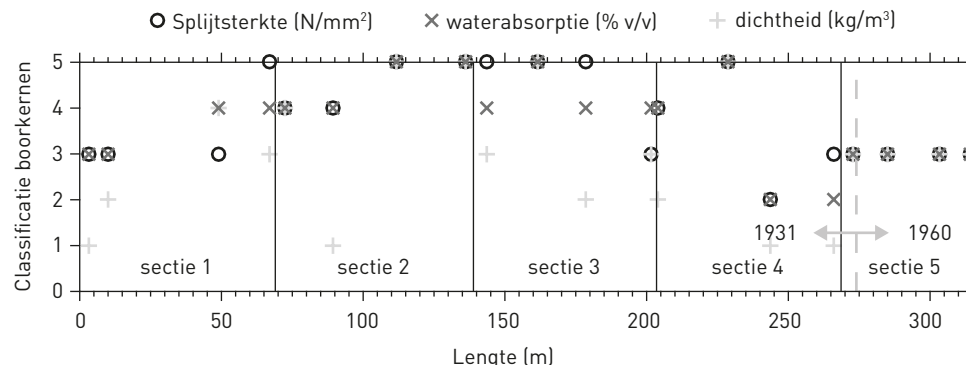
Het onderzoek vond plaats bij een (gemengd) eivormig riool van 300/450 mm. Een deel hiervan is 274 m lang en in 1931 aangelegd, het andere deel is 42 m lang en in 1960 aangelegd. Deze riolen zijn volgens de geldende normen visueel geïnspecteerd met een CCTV-systeem. Om de betrouwbaarheid van de classificaties te vergroten, hebben twee onafhankelijke inspecteurs de beelden geclassificeerd. (Uit Dirksen *et al* (2013) blijkt immers dat de interpretatie van inspectiebeelden en de klassietoekenning onderhevig zijn aan het subjectieve oordeel van de inspecteur.) Bij elke sectie tussen twee rioolputten zijn vier boorkernen genomen, uit zowel de bodem als de kruin van de buis.

In de figuren 2.1 en 2.2 ziet u de resultaten van respectievelijk de visuele inspectie (dubbele resultaten) en de classificatie van de boorkernen (alleen de monsters uit de kruin van de buis).

Figuur 2.1 Toestandsclassificatie langs lengteprofiel gebaseerd op CCTV-inspectie



Figuur 2.2 Toestandsclassificatie langs lengteprofiel gebaseerd op boorkernen bovenkant buis



Uit figuur 2.1 blijkt dat de twee classificatieronden van de inspectiebeelden inderdaad van elkaar verschillen. Verder blijkt uit figuur 2.2 dat in de classificatie van de boorkernresultaten per gekozen parameter een behoorlijke spreiding zit. Zo is in secties 2 en 5 sprake van een verschil van drie klassen tussen de beoordeling voor splijttreksterkte en dichtheid.

De resultaten van de boorkernanalyse staan in tabel 2.3.

Tabel 2.3 Resultaten boorkernanalyse

	Dikte (mm)		Dichtheid (kg/m ³)		Splijttreksterkte (N/mm ²)		Water-absorptie (%)	
	bodem	kruin	bodem	kruin	bodem	kruin	bodem	kruin
μ (Gemiddelde)	64,3	66,0	2.165	2.198	2,45	2,59	13,35	11,68
σ (Standaardafwijking)	2,0	2,2	119,80	81,21	1,24	1,18	4,03	2,59
Gemiddelde klasse	—	—	4	3	4	3	4	4

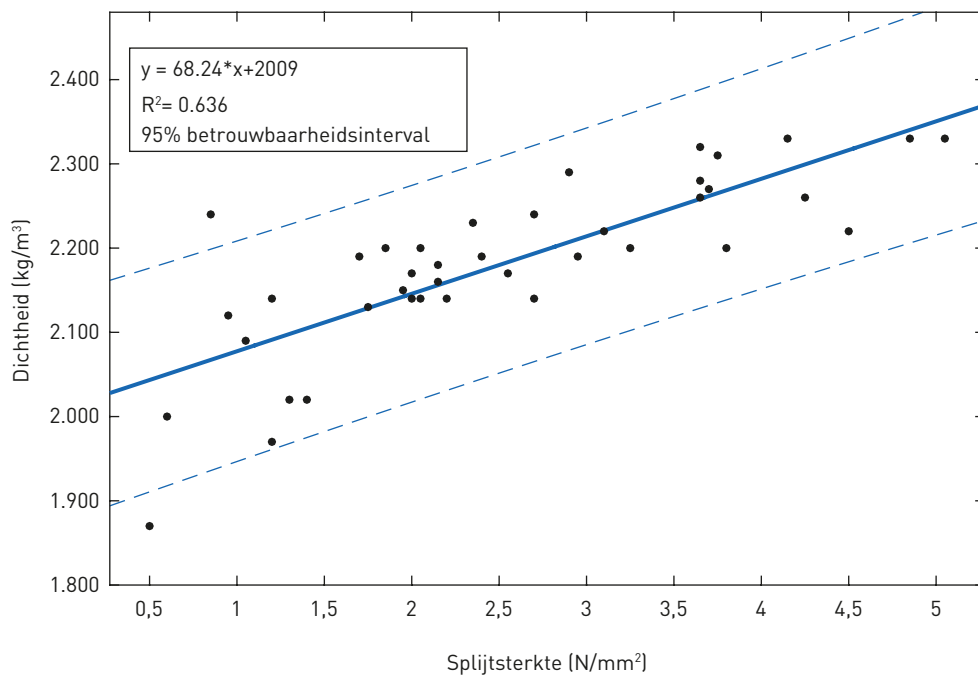
In de praktijk worden meestal alleen boorkernen genomen uit de kruin van de buis. Dit is om uitvoeringstechnische redenen en omdat corrosie vooral in de kruin van de buis optreedt. Maar zoals uit tabel 2.3 valt op te maken, heeft ook het materiaal in de bodem van de buis te maken met verouderingsverschijnselen. In de figuren 2.3a,b,c ziet u de relaties tussen splijttreksterkte, dichtheid en waterabsorptie.

Uit de figuren 2.3a,b,c blijkt dat in alle parameters een behoorlijke spreiding zit. Dit duidt op een grote inhomogeniteit. Verder is de grootste correlatie tussen splijttreksterkte en dichtheid gevonden.

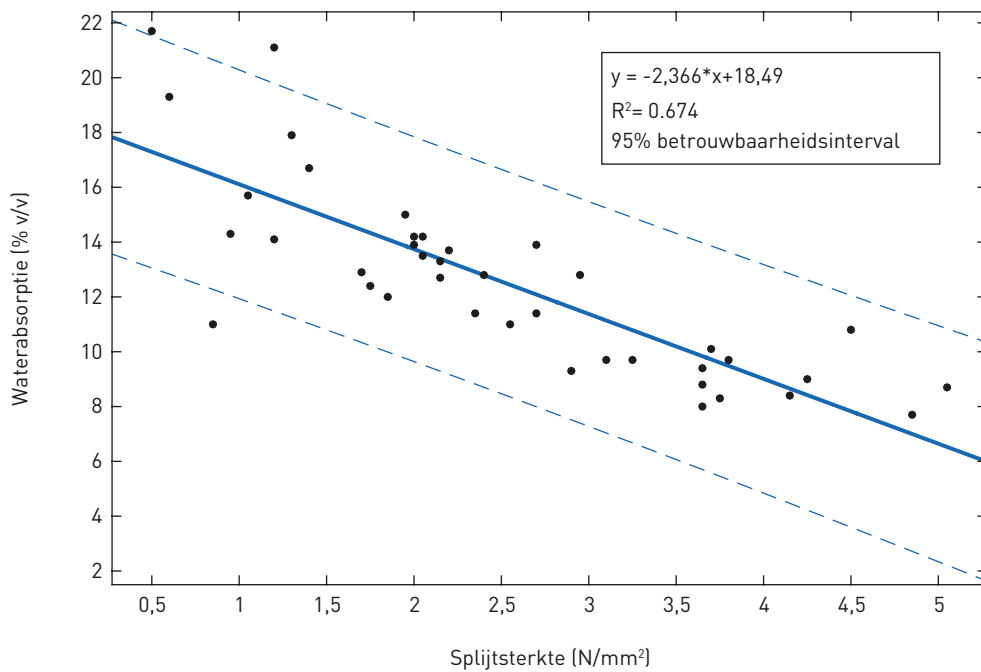
De gevonden inhomogeniteit is te verklaren door:

- Slecht geconditioneerde productieomstandigheden.
- Ruimtelijke variatie in de processen die verantwoordelijk zijn voor de veroudering van het materiaal.

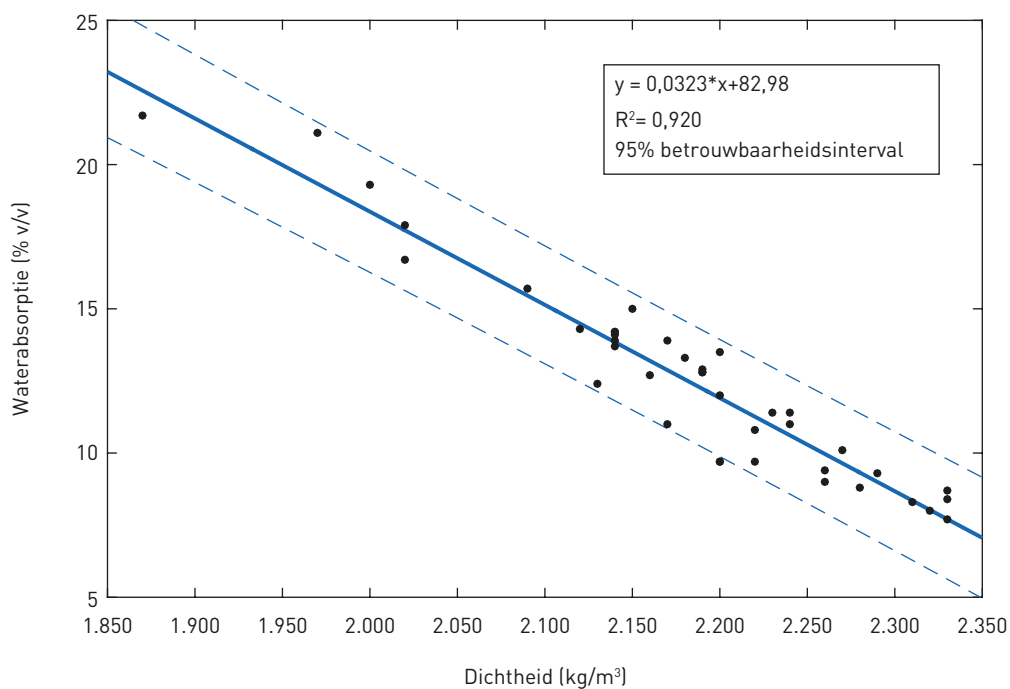
Deze inhomogeniteit is overigens bevestigd in vervolgonderzoek (zie hoofdstuk 5).



Figuur 2.3a Correlatie tussen dichtheid en splijtsterkte



Figuur 2.3b Correlatie tussen splijtsterkte en waterabsorptie



Figuur 2.3c Correlatie tussen dichtheid en waterabsorptie

3 Laserprofiling

3.1 De praktijk

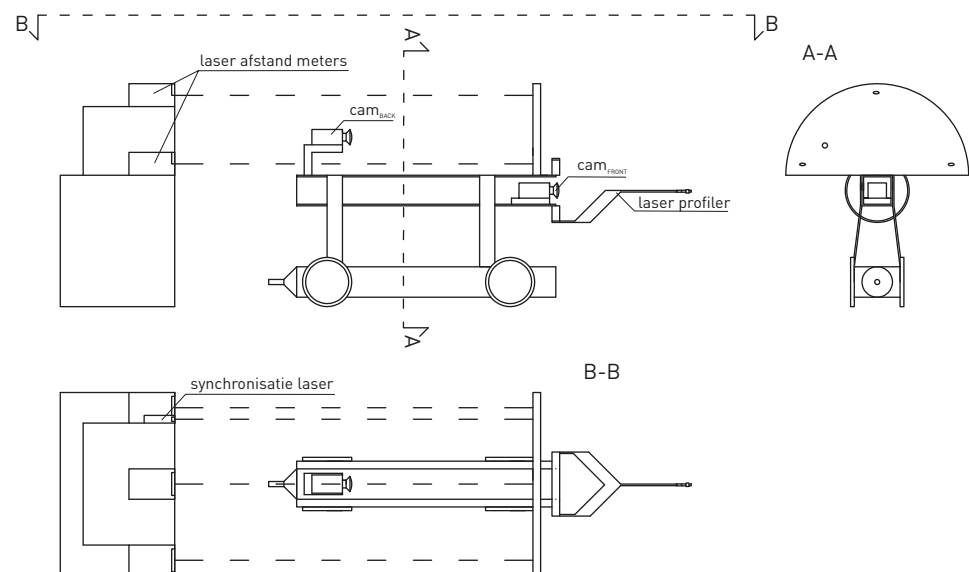
Laserprofiling wordt al ruim 15 jaar in riolering toegepast (*Duran et al., 2003*). Het is een vrij eenvoudige techniek met een reguliere rioolinspectiecamera waarop een systeem is gemonteerd dat laserlicht op de buiswand projecteert. Zo ontstaat een beeld van de vorm van de buis. In de praktijk passen beheerders deze techniek voornamelijk toe in ronde kunststof leidingen om een eventuele vervorming (ovaliteit) te kunnen bepalen. Maar de nauwkeurigheid van de meetmethode is beperkt doordat de exacte positie en oriëntatie van de camera niet worden gemeten. Door onder meer obstakels, sediment en ongelijke voegen hobbelt de camera en veranderen de positie en kijkhoek. Hierdoor staat de geprojecteerde laserlijn dus niet altijd haaks op de as van de buis, wat zorgt voor een onbekende systematische meetfout.

Als de exacte positie en oriëntatie van de camera bekend zijn, is de onbekende systematische meetfout te corrigeren. Of (en zo ja in hoeverre) dit mogelijk is, is in het laboratorium onderzocht.

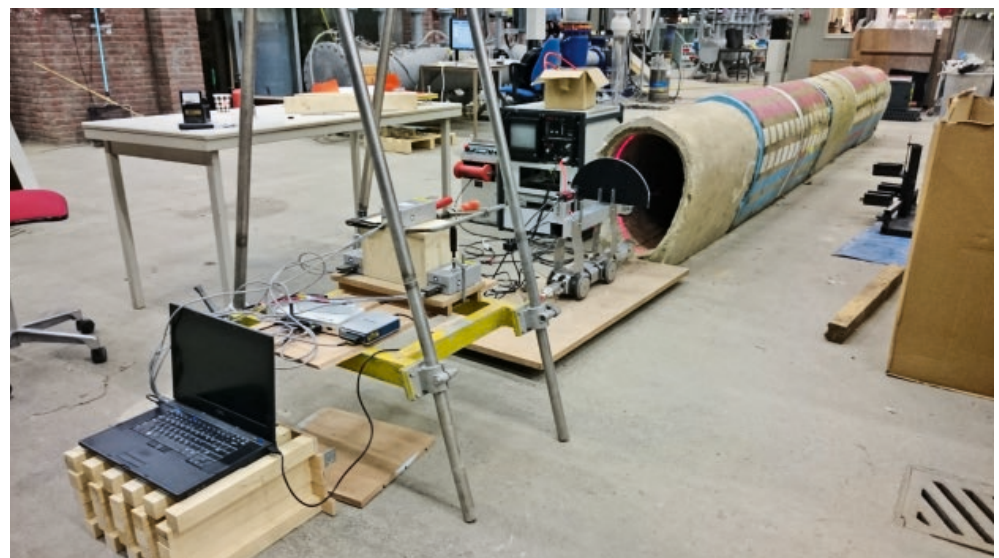
3.2 Laboratoriumonderzoek meetfoutcorrectie

Voor het laboratoriumonderzoek is de in de praktijk voorkomende combinatie van laserprofiling en een CCTV-camera op een riooltractor gebruikt, uitgebreid met een systeem van drie laserafstandsmeters, een tweede camera en een reflectieplaat achter op de riooltractor. De drie laserafstandsmeters zijn exact parallel aan elkaar opgesteld en meten de afstand tot de reflectieplaat die parallel loopt aan het op de buiswand geprojecteerde laserlicht van de profiler. De tweede (achter op de camera gemonteerde) videocamera registreert de door de laserafstandsmeter geprojecteerde punten (zie de figuren 3.1 en 3.2).

Figuur 3.1 Schema opzet experiment met laser



Figuur 3.2 Testopstelling laserprofiler



Werkingsprincipe

In het kort komt het erop neer dat aan de hand van de waargenomen verschuiving van de geprojecteerde laserpuntjes en de drie gemeten afstanden de exacte locatie en ruimtelijke oriëntatie van de laserprofiler zijn te bepalen ten opzichte van de drie stationair opgestelde laserafstandsmeters. Want als de tractor hobbelt (rotatie) of afwijkt in verticale of horizontale richting, vertaalt zich dat in ongelijke afstandsmetingen van de lasers of een andere positie van de laserpuntjes zoals de achterste camera die registreert. Door deze gegevens met de opgenomen beelden van de op de buiswand geprojecteerde lasersheet te combineren, ontstaat een exact 3D-beeld van de binnengeometrie.

Gebruikte apparatuur

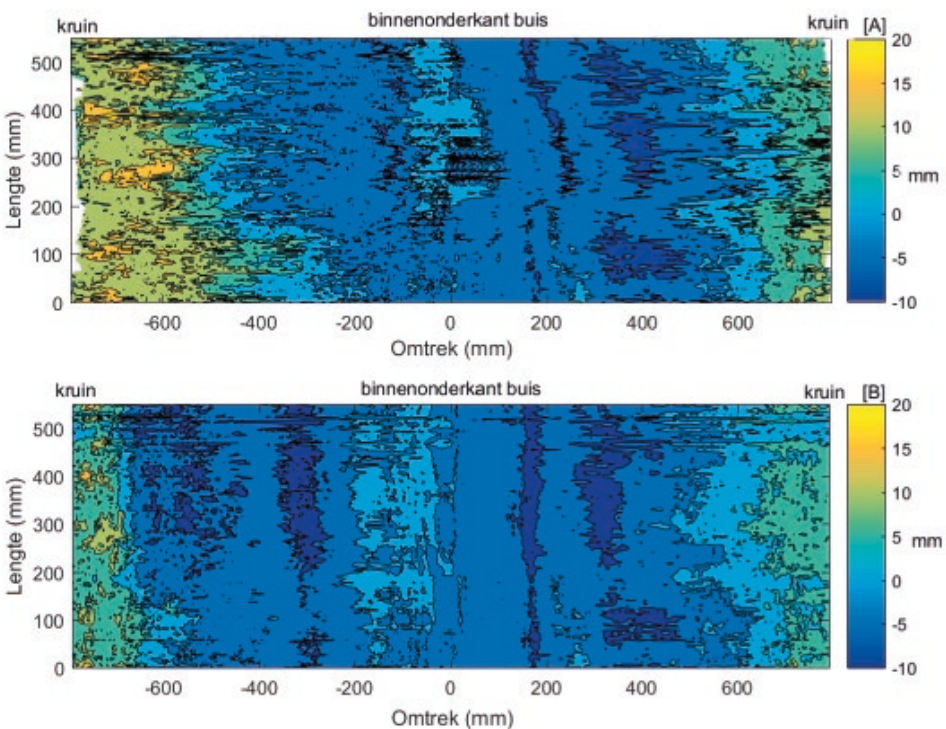
De laserafstandsmeters zijn geijkt en hebben een nauwkeurigheid van ongeveer 0,19 mm (95%-betrouwbaarheidsinterval van 0,75 mm) binnen het gebruikte meetbereik. Verder zijn de gebruikte camera's gekalibreerd. Dit wil zeggen dat de optische vervorming van de lens is bepaald en dat de beeldopnamen daarvoor zijn gecorrigeerd en de nauwkeurigheid van de camerasensor is bepaald. Tabel 3.1 geeft een overzicht van de gebruikte instrumenten. Details over deze methode en de verwerking van de waarnemingen vindt u in *Stanić (2016)* en *Clemens et al. (2015)*.

	Type/Model	Standaardafwijking σ (in mm)
cam _{FRONT}	Allied Vision/Prosilica GT3400C	0,0073
cam _{BACK}	Allied Vision/Manta G-282C	0,0073
Laserafstandsmeters	Dimetix/FLS-C10	0,1888
Laserprofiler	Ibak/ILP	-
Afmetingen meetopzet	-	0,25

Tabel 3.1 Eigenschappen gebruikte instrumenten

3.3 Onderzoekresultaten

Figuur 3.3 toont het verschil tussen het ontwerpprofiel (eivormige buis van 60/90 mm) en het gemeten binnenprofiel voor ongecorrigeerde en gecorrigeerde laserprofilermetingen. Het gaat om een buis die 89 jaar dienst heeft gedaan en duidelijk te lijden heeft gehad van krooncorrosie. Daarnaast is het dwa-niveau herkenbaar aan een afzetting nabij de bodem van de buis.

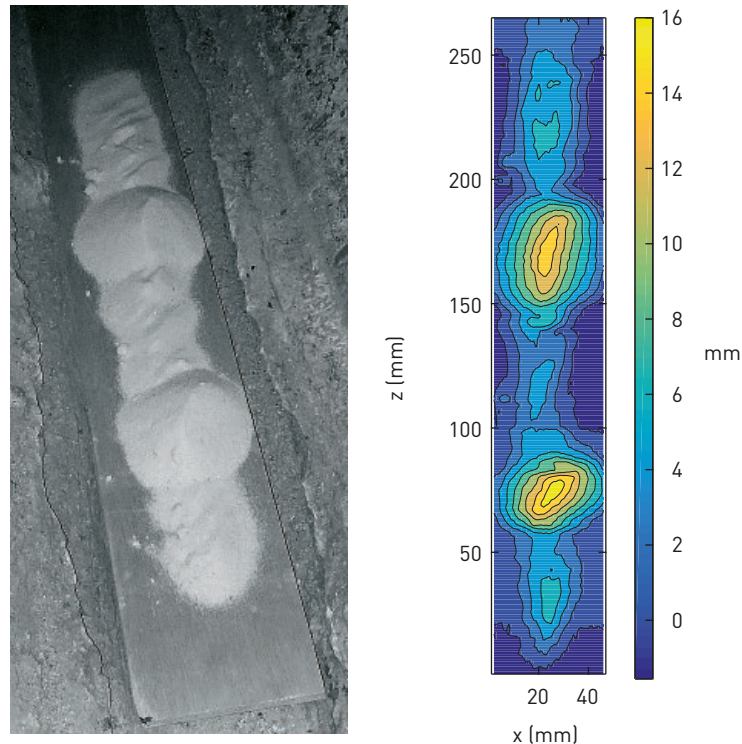


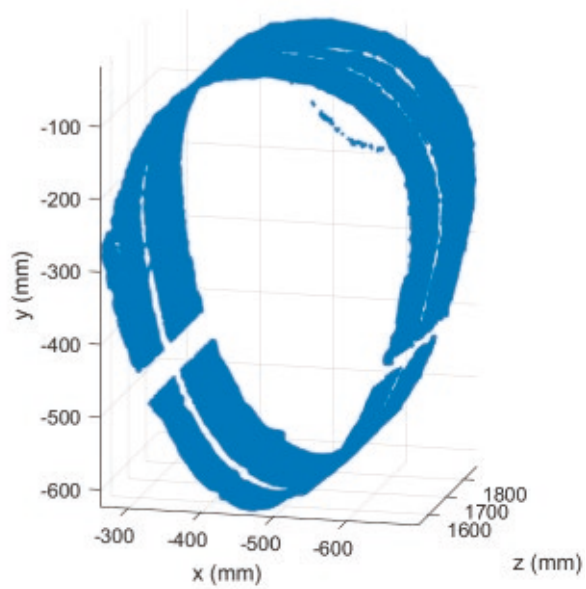
Figuur 3.3 Verschil tussen ontwerpprofiel en gemeten geometrie voor 89 jaar oude buis
N.B. De bovenste grafiek toont het niet-gecorrigeerde resultaat en de onderste grafiek toont het resultaat na correctie van de laserpositie.

Uit figuur 3.3 is op te maken dat het wanddikteverlies in de gecorrigeerde metingen duidelijk minder groot is dan in de ongecorrigeerde metingen. De niet-gecorrigeerde metingen leiden tot een overschatting van de binnenprofielafmetingen. Immers, bij een kijkrichting niet loodrecht op de wand lijkt de binnendiameter altijd groter en wordt dus een hoger materiaalverlies ingeschat. Conclusie is dat niet-gecorrigeerde laserprofilermetingen zeer waarschijnlijk een te pessimistisch beeld geven van het wanddikteverlies.

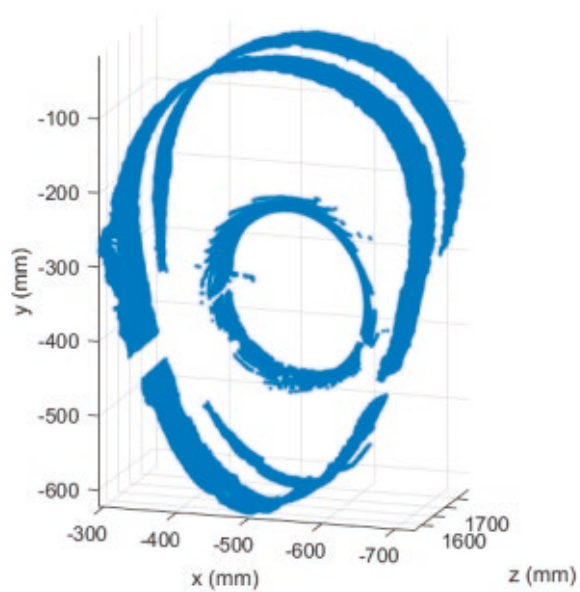
Uiteindelijk is met de ontwikkelde technieken een meetnauwkeurigheid van 2 mm (95%-waarschijnlijkheidsinterval) te bereiken. Ook is – voorlopig alleen nog in een laboratorium – het sedimentvolume in een buis met een nauwkeurigheid van 3% te bepalen (zie de figuur 3.4). Daarnaast zijn experimenten gedaan met diverse voorwerpen, zoals stenen en flesjes. Het blijkt dat glas of sterk reflecterende oppervlakken (denk aan geglazuurde tegeltjes) niet of zeer moeilijk waarneembaar zijn. In de praktijk komen sterk reflecterende oppervlakken niet veel voor in de riole-ring, dus dit hoeft niet direct een beperking te zijn. Figuur 3.5 en 3.6 tonen de resultaten van experimenten met een loshangende rubbering en een binnenband in het riool.

Figuur 3.4 Experiment met sediment in rioolbuis: vergelijking foto en meetwaarden





Figuur 3.5 Loshangende rubberring: foto (links) en gemeten profiel met laser (rechts)



Figuur 3.6 Object (binnenband) in riool: foto (links) en gemeten profiel met laser (rechts)

4 Meten hydraulische ruwheid

4.1 De praktijk

Bij het ontwerp van een riool is de hydraulische weerstand een belangrijke parameter. Als regel wordt uitgegaan van een defaultwaarde van 3 mm (*Leidraad riolering*) of 1,5 mm (*Hager, 1999*) en doorgaans 0,15 mm voor persleidingen. Maar in de praktijk is bekend dat deze waarde na verloop van tijd verandert. Door corrosie kan de ruwheid van de buiswand toenemen, maar ook obstakels en sedimentafzettingen hebben hun invloed op de uiteindelijke waarde van de hydraulische weerstand (zie ook *Van Bijnen et al., 2012*)

De hydraulische capaciteit bepaalt in belangrijke mate of een riool nog voldoet aan de gestelde eisen. Daarom zou het handig zijn als deze in het veld gemakkelijk is vast te stellen, bij voorkeur met niet-destructieve technieken. De meest eenvoudige methode is om bij een bekend debiet het drukhoogteverschil over een leiding te meten. Maar zeker bij grotere leidingen is dit zeer kostbaar, waardoor deze methode nauwelijks wordt toegepast.

Eenzelfde probleem doet zich voor bij het bepalen van de hydraulische capaciteit van geboorde tunnels voor waterkrachtcentrales. *Pegram & Pennington (1996)* hebben hiervoor een methode ontwikkeld waarmee op basis van zeer nauwkeurige laserscangegevens van de buiswand een waarde voor de hydraulische ruwheid is vast te stellen. Grofweg komt de methode erop neer dat met een Fourieranalyse een karakteristieke maat voor de oneffenheid van de wand is te bepalen, waaruit de hydraulische ruwheid is af te leiden. In zijn promotieonderzoek heeft Stanić de toepassing van deze methode op rioolbuizen onderzocht.

4.2 Laboratoriumonderzoek hydraulische ruwheid

In het onderzoek zijn vijf buizen gebruikt: twee buizen van 89 jaar uit Den Haag die duidelijke sporen van krooncorrosie vertonen, twee buizen van 59 jaar uit Breda en een nieuwe buis. Uit elke buis zijn steeds drie monsters genomen: uit de kruin, zijwand en bodem. Daarna zijn deze monsters gescand met een Nikon-LC60Dx-lijns scanner met een scanresolutie van 0,01 mm. Daarnaast is een verificatiemonster gebruikt uit een onderzoek van *Ali & Uijtewaal (2013)*. De hydraulische ruwheid van dit monster is op traditionele wijze bepaald in een hydraulisch laboratorium op een waarde van 5,5 mm. Uit de laserscan volgde een ruwheidswaarde van 5,33 mm, met een standaardafwijking van 1,06 mm. Met andere woorden: een zeer vergelijkbaar resultaat. Tabel 4.1 vat de meetresultaten samen.

Tabel 4.1 Samenvatting meetresultaten

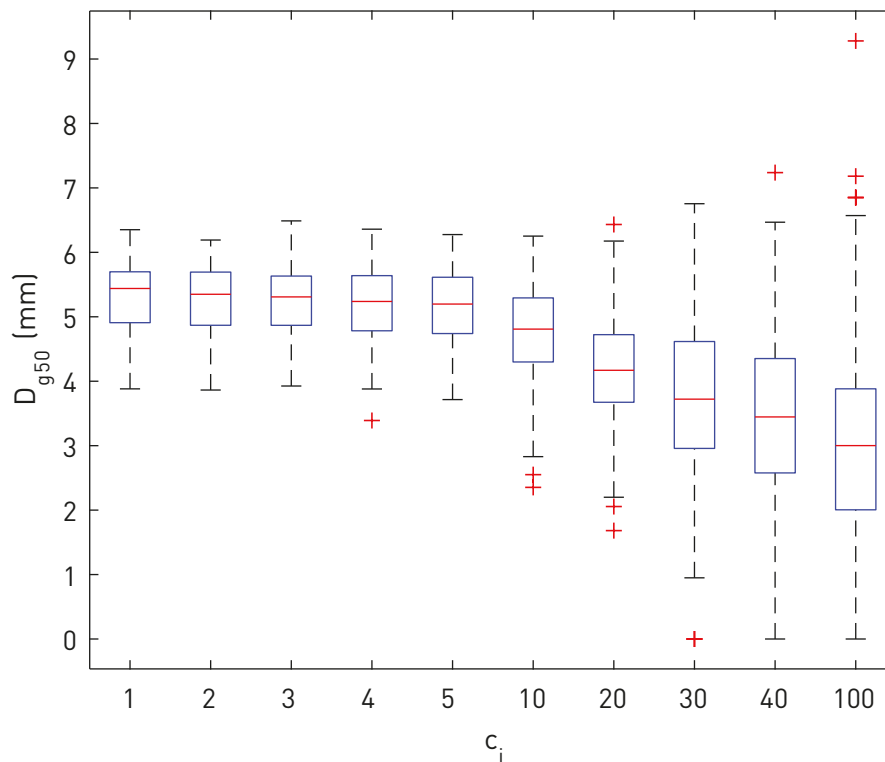
Monster	k_s (mm)	σ_{tot} (mm)
Nieuwe buis (P01)	0,54	0,07
Breda 1 ^e buis (59 jaar oud) (P02)		
Bodem	0,53	0,13
Wand	1,48	0,05
Kruin	0,95	0,05
Breda 2 ^e buis (59 jaar oud) (P06)		
Bodem	0,54	0,03
Wand	0,94	0,04
Kruin	1,1	0,03
Den Haag 1 ^e buis (89 jaar oud) (P08)		
Bodem	0,89	0,11
Wand	1,5	0,05
Kruin	9,93	0,32
Den Haag 2 ^e buis (89 jaar oud) (P10)		
Bodem	0,76	0,09
Wand	1,44	0,06
Kruin	12,74	1,62

Uit tabel 4.1 zijn de volgende conclusies te trekken:

- De bodemruwheid blijkt in alle buizen dezelfde orde van grootte te hebben.
- Krooncorrosie (Den Haag buis 1 en 2) leidt plaatselijk tot een zeer hoge waarde voor de ruwheid bij de kruin (zie tabel 4.1) (10 tot 13 mm).

4.3 Lagere meetresolutie

Voor de praktijk is het relevant of ook met een minder hoge meetresolutie iets is te zeggen over de wandruwheid. Om dit te bepalen, is nagegaan tot welke resolutie de meting is te reduceren zonder dat de uitkomst te veel aan betrouwbaarheid en nauwkeurigheid verliest.



Figuur 4.1 Boxplot berekende ruwheid validatiemonster
N.B. Elke boxplot toont de mediaan (middelste lijn in rechthoeken), het 25- en 75-percentiel (randen rechthoeken) en de minimum- en maximumwaarde van het betrouwbaarheidsinterval. Uitschieters zijn individueel geplot.

In figuur 4.1 ziet u het resultaat voor het validatiemonster. Op de horizontale as staat de reductiefactor van de meetresolutie, op de verticale as de gevonden wandruwheid. Bij een resolutiereductie met een factor 10 of meer neemt zowel de betrouwbaarheid als de nauwkeurigheid af. Dit houdt in dat bij een ruwheid van 5 mm een minimale meetresolutie van 0,1 mm noodzakelijk is. Op termijn lijkt het haalbaar een dergelijke resolutie ook in de praktijk te realiseren. Dan is de wandruwheid van riolen ‘in het veld’ te meten. Hoewel dit een stap voorwaarts is, is dit nog onvoldoende om de hydraulische capaciteit van een riool te bepalen. Hiervoor moeten ook nog de effecten van onder meer obstakels en voegverbindingen worden vastgesteld. Als deze nauwkeurig in beeld zijn te brengen (bijvoorbeeld via laserprofilering, zie hoofdstuk 3), dan is het theoretisch mogelijk aan de hand daarvan de effecten op de hydraulische capaciteit te bepalen. Hiervoor is nog wel aanvullend onderzoek nodig.

5 Bepalen homogeniteit materiaaleigenschappen

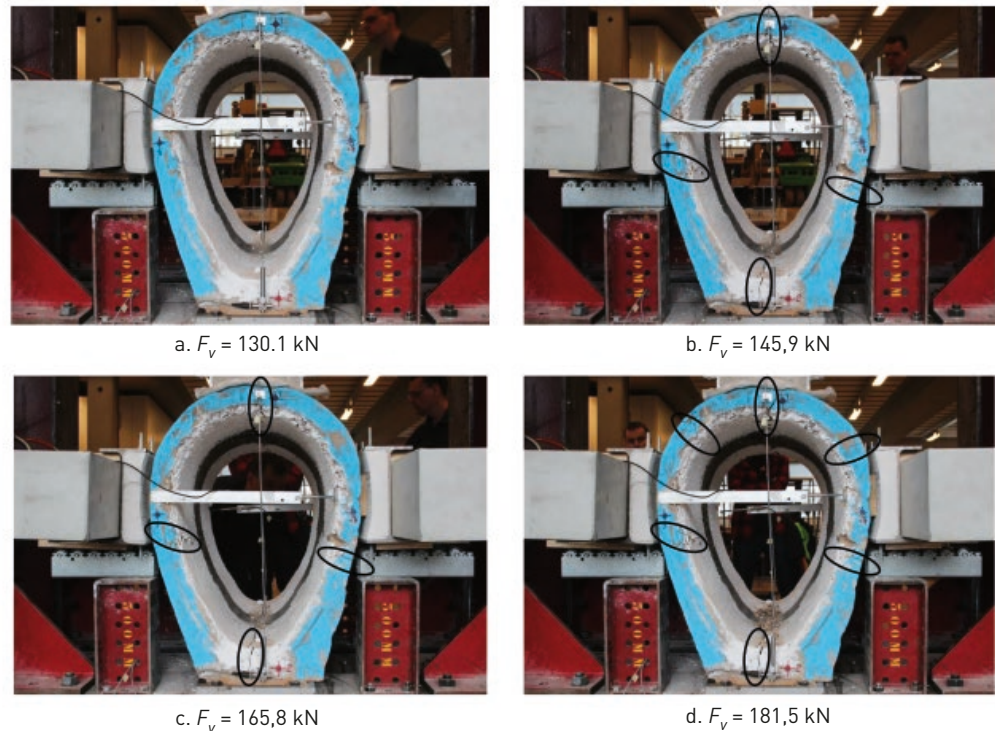
5.1 De praktijk

De materiaaleigenschappen van betonnen rioolbuizen worden in de praktijk bepaald via boorkernonderzoek. Hiervoor wordt meestal vanaf maaiveld (dus aan de bovenkant van de buis) een monster uit de buis genomen voor nader onderzoek. In zijn promotieonderzoek heeft Stanić de homogeniteit onderzocht van de materiaaleigenschappen bepaald op basis van boorkernen om zo een mogelijke verklaring te vinden voor de grote spreiding in resultaten gevonden in hoofdstuk 2.

5.2 Testopzet belasting rioolbuizen

In het onderzoek zijn dezelfde vijf eivormige ongewapend betonnen buizen beproefd als in het vorige hoofdstuk: een nieuwe buis, twee buizen van 59 jaar uit Breda en twee buizen van 89 jaar uit Den Haag. Met name de buizen uit Den Haag vertonen duidelijke sporen van krooncorrosie.

Figuur 5.1 Testopstelling
betonnen rioolbuizen



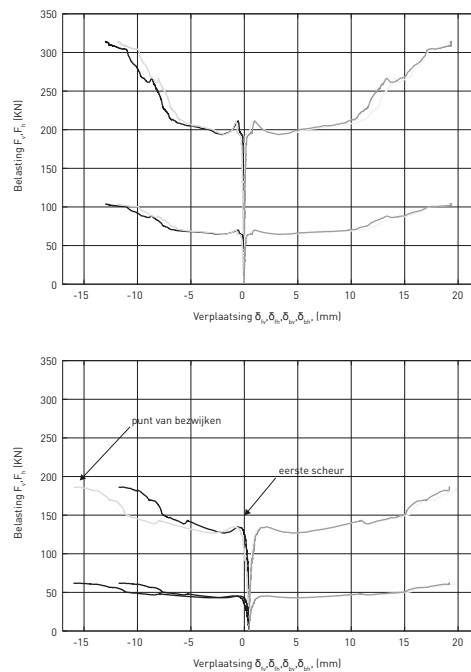
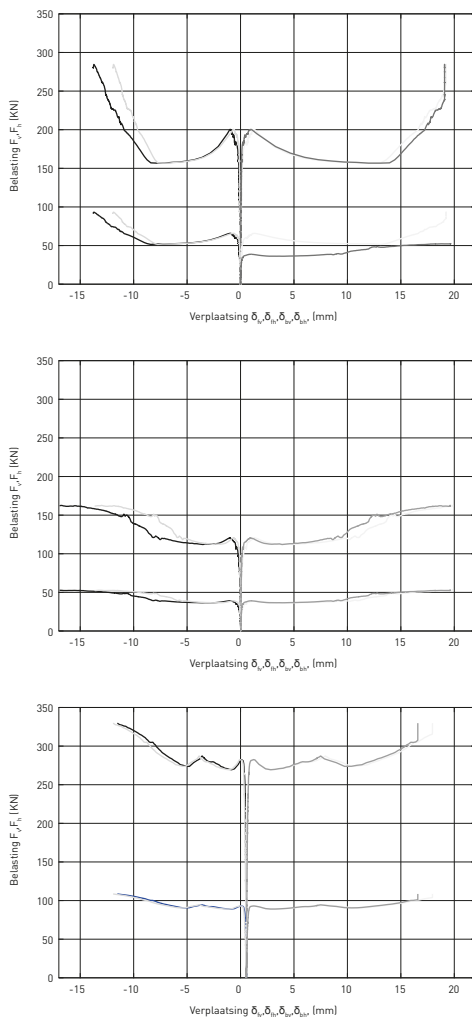
Figuur 5.1 toont de proefopstelling. De buizen worden op de kruin belast en aan beide zijken ondersteund door een kracht die steeds een derde is van de bovenbelasting. Zo is getracht de interactie tussen buis en grond enigszins na te bootsen. Deze testmethode is realistischer dan alleen meten met een bovenbelasting, zoals vaak gebeurt.

Behalve de belasting zijn ook gemeten:

- de horizontale verplaatsing;
- de verticale verplaatsing;
- het ontstaan van scheuren;
- de volgorde waarin scheuren ontstaan.

5.3 Testresultaten belasting rioolbuizen

Figuur 5.2 toont de krachtverplaatsingsgrafieken van de vijf geteste buizen. Bij alle buizen ontstond de eerste scheur in de lengterichting in de bodem. Pas daarna kwamen er twee scheuren in de zijwanden, ongeveer op de overgang van wand naar kruin. Als laatste ontstond een scheur in de kruin, waarna de buis zijn stabiliteit verloor. Als deze scheurvolgorde in de praktijk hetzelfde is, kan dat inhouden dat juist op de plek die je met visuele inspectie door stromend rioolwater meestal niet ziet, de eerste scheur ontstaat. Of dit ook daadwerkelijk zo is, moet nader worden onderzocht.



Figuur 5.2 Krachtverplaatsingsgrafieken voor 59 jaar oude rioolbuizen uit Breda (a en b), 89 jaar oude rioolbuizen uit Den Haag (c en d) en nieuwe buis (e)

N.B. Legenda: Fv - verticale kracht, Fh - horizontale kracht, δ_v - voorzijde verticale verplaatsing, δ_{bv} - achterzijde verticale verplaatsing, δ_{vh} - voorzijde horizontale verplaatsing, δ_{bh} - achterzijde horizontale verplaatsing.

Uit figuur 5.2 is af te leiden dat de oude leidingen veel eerder scheuren dan de nieuwe leiding (nieuw: 290 kN, 59 jaar oud: 200 kN en 89 jaar oud: circa 120 kN). (N.B. Voor nieuwe buizen geldt bij de standaardkwaliteitsproef van de fabrikant met alleen bovenbelasting voor dit type buis een bezwijkkracht van gemiddeld 131 kN.) Verder valt op dat na het ontstaan van de eerste scheur behoorlijke horizontale en verticale verplaatsingen optreden voordat de buis als 'ingestort' (verlies aan stabiliteit) is te beschouwen.

5.4 Bepalen materiaaleigenschappen

Na de beproeving zijn uit de restanten van de buizen boorkernen genomen om de volgende materiaaleigenschappen te bepalen:

- splijttreksterkte;
- buigtreksterkte;
- carbonatatie diepte aan zowel de binnen- als buitenkant van de buis;
- porositeit;
- dichtheid.

Bovendien is via microscopisch onderzoek de aanwezigheid van ettringiet nagegaan om zo een beeld te krijgen van het type aantasting.

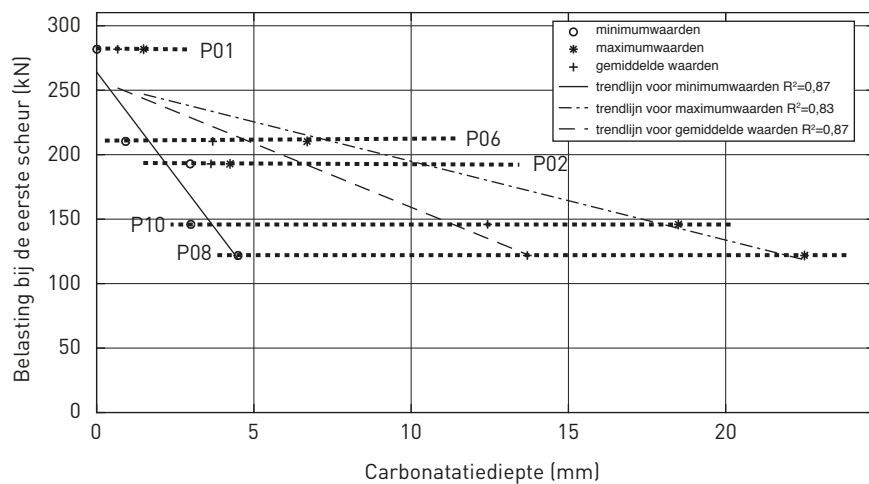
Voor de vijf buizen is gezocht naar relaties tussen de materiaalparameters en de belasting waarbij de eerste scheuren (F_s) ontstonden.

In de figuren 5.3, 5.4, 5.5 en 5.6 ziet u de relaties tussen F_s en enkele materiaaleigenschappen. De nummers van de buizen komen overeen met de nummers uit tabel 4.1 en tabel 5.1.

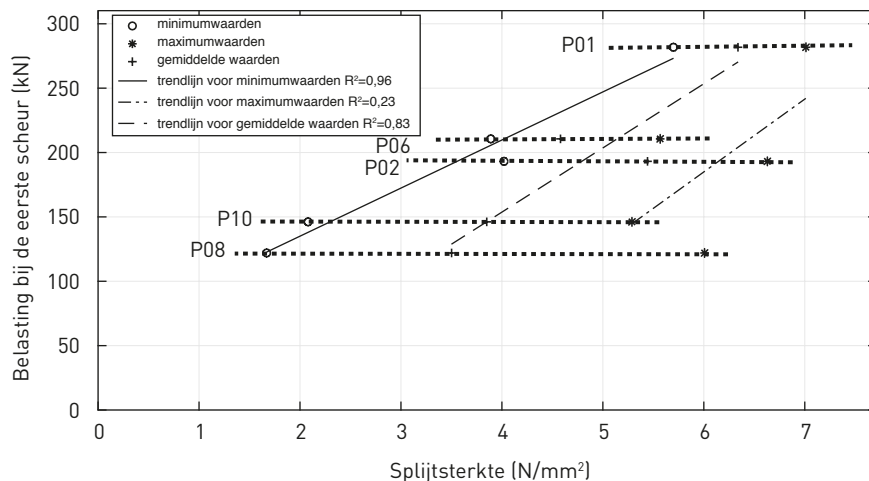
Hierbij zijn drie relaties geanalyseerd:

- F_s en maximale waarden;
- F_s en gemiddelde waarden;
- F_s en minimale waarden.

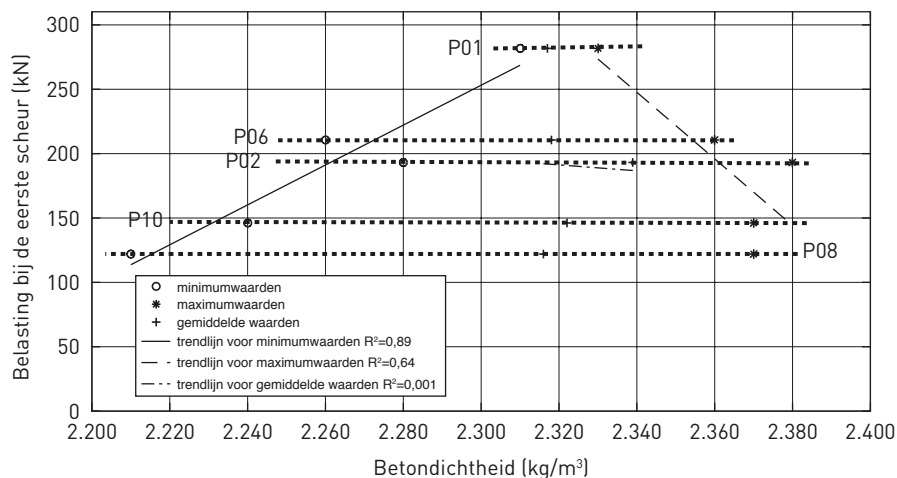
Figuur 5.3 Relatie kracht bij eerste scheur en carbonatatie diepte binnenkant buis



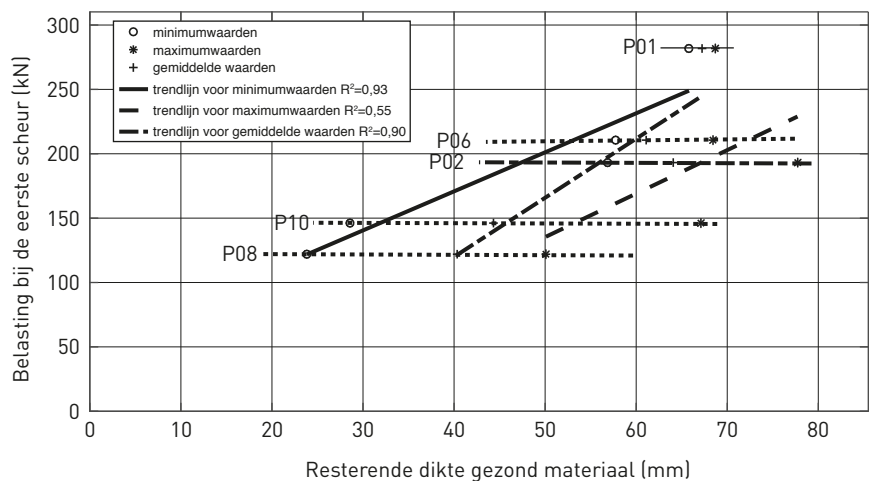
Figuur 5.4 Relatie kracht bij eerste scheur en buigtreksterkte



Figuur 5.5 Relatie kracht bij eerste scheur en dichtheid beton



Figuur 5.6 Relatie kracht bij eerste scheur en dikte niet-aangetast materiaal



Op grond van de resultaten zijn de conclusies:

- Bij de oude leidingen is sprake van een grote inhomogeniteit van de materiaaleigenschappen. Daarbij lijkt de inhomogeniteit in de tijd toe te nemen, de oudste buizen tonen de grootste spreiding. Dit is niet zonder meer toe te schrijven aan het aantastingsproces, omdat de oorspronkelijke materiaalkwaliteit niet bekend is.
- De buigtreksterkte en de dikte 'gezonder' materiaal D_g (dat wil zeggen: oorspronkelijke wanddikte minus de carbonatatie diepte aan binnen- en buitenkant) hebben de grootste correlatie met F_s . Met name de gemiddelde waarde voor D_g en de minimale waarde voor de buigtreksterkte vertonen een hoge correlatie met F_s . De overige materiaalparameters hebben lage correlaties met F_s . Grofweg is te stellen dat D_g een maat is voor de geometrie en de buigtreksterkte een maat voor de mechanische materiaaleigenschappen.

5.5 Aantal monsters voor betrouwbare waarde

Gezien de grote inhomogeniteit is het de vraag hoeveel boorkernen nodig zijn om een betrouwbaar beeld te krijgen van de toestand van een rioolbuis. Stel dat u de materiaaleigenschappen van een buis met een betrouwbaarheid van 95% wilt weten. Via statistische bewerkingen op de verzamelde data geeft tabel 5.1 weer hoeveel monsters dan per parameter nodig zijn.

Buis	Parameter	Schatting gemiddelde waarde	Schatting standaard-afwijking	Aantal monsters voor een betrouwbare schatting
P01 (Nieuw)	Resterende dikte gezond materiaal	67,3 mm	2,05 mm	1
	Dichtheid	2.317 kg/m ³	11,5 kg/m ³	1
	Buigtreksterkte	6,34 N/mm ²	0,86 N/mm ²	7
P02 (59 jaar oud)	Resterende dikte gezond materiaal	64,0 mm	5,4 mm	3
	Dichtheid	2.339 kg/m ³	28,46 kg/m ³	1
	Buigtreksterkte	5,44 N/mm ²	0,90 N/mm ²	11
P06 (59 jaar oud)	Resterende dikte gezond materiaal	61 mm	3,4 mm	2
	Dichtheid	2.318 kg/m ³	30,48 kg/m ³	1
	Buigtreksterkte	4,58 N/mm ²	0,53 N/mm ²	6
P08 (89 jaar oud)	Resterende dikte gezond materiaal	40,3 mm	8,9 mm	19
	Dichtheid	2.316 kg/m ³	43,25 kg/m ³	1
	Buigtreksterkte	3,50 N/mm ²	1,32 N/mm ²	55
P10 (89 jaar oud)	Resterende dikte gezond materiaal	44,3 mm	11,0 mm	24
	Dichtheid	2.322 kg/m ³	41,04 kg/m ³	1
	Buigtreksterkte	3,85 N/mm ²	2,08 N/mm ²	112

Tabel 5.1 Aantal monsters voor 95%-betrouwbaarheidswaarde

Opvallend is dat voor een betrouwbaar beeld van bijvoorbeeld de buigtreksterkte ook voor een nieuwe buis minimaal zeven monsters nodig zijn. Met toenemende inhomogeniteit loopt dit aantal zelfs op tot meer dan honderd. Om na te gaan of de gevonden inhomogeniteit geen incident is, zou dit onderzoek bij voorkeur nog een aantal keer moeten worden herhaald. Maar als de gevonden spreiding in oude leidingen een algemeen verschijnsel blijkt te zijn, is dat ongunstig voor de waarde van boorkernonderzoek. Want als alleen een betrouwbaar beeld van materiaaleigenschappen ontstaat door tientallen monsters te nemen, dan verliest deze informatiebron zijn praktische waarde.

In elk geval is het aan te bevelen niet blind te varen op de gevonden waarden uit een enkele boorkern. In deze zin is er een relatie met de beschreven inhomogeniteit in boorkernonderzoek in hoofdstuk 2. Inhomogeniteit blijkt zich niet alleen te manifesteren in verschillende buizen binnen een rioolstreng, maar ook binnen een buis. Het is dus zeer de vraag of de schijnbaar exacte waarden voor de materiaalparameters uit standaardboorkernonderzoek in de praktijk een betrouwbaar beeld kunnen geven.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Het promotieonderzoek heeft geleid tot de volgende conclusies:

- De materiaalkwaliteit van de onderzochte buizen is zeer inhomogeen, waardoor het nemen van slechts enkele boorkernen onvoldoende betrouwbare informatie oplevert.
- Met laserprofilering is een betrouwbaar 3D-beeld van de binnengeometrie van een rioolbuis te krijgen met een gekwantificeerde nauwkeurigheid. Hierbij is het essentieel dat de exacte positie en ruimtelijke oriëntatie van de meetopzet bekend zijn. Hiertoe is een systeem ontwikkeld dat deze informatie geeft aan de hand van drie laserafstandsmeters en beeldanalyse. Op basis daarvan zijn de ruwe gegevens uit de laserprofiler te corrigeren.
- Aangetoond is dat met de gecorrigeerde laserprofileringstechniek (in een laboratorium) veel soorten voorwerpen zijn te herkennen. Ook is aangetoond dat met deze techniek het sedimentvolume in een buis met een nauwkeurigheid van 3% (zie § 3.3) is te bepalen.
- Met een hogeresolutielaserscanner is de textuur van de buiswand te meten. Het is aanmerkelijk gemaakt dat hieruit een betrouwbare waarde voor de hydraulische ruwheid is af te leiden.

6.2 Aanbevelingen

Om de ontwikkelde technieken in de praktijk te kunnen toepassen, zijn de volgende ontwikkelingen noodzakelijk:

- Een systeem om de positie van de laser profiler te bepalen (de huidige opstelling werkt niet als geen visueel contact met de laserprofiler mogelijk is). Denk aan de toepassing van zeer nauwkeurige optische gyroscopen. Bovendien moet de synchronisatietechniek van de data-acquisitie tussen de twee onderdelen van de meetopzet worden verbeterd. (TU Delft heeft op dit laatste punt inmiddels belangrijke vorderingen gemaakt.)
- Het toepassen van CFD-methoden (Computational Fluid Dynamics) om de hydraulische weerstand van obstakels en voegverbindingen te berekenen aan de hand van 3D-beelden van buizen. In combinatie met wandruwheidsmetingen is zo zonder omslachtige en kostbare metingen de actuele hydraulische capaciteit van een leiding nauwkeurig in te schatten.
- Ontwikkeling van een laseroppervlaktescanner die in de buis is te brengen, zodat de textuur van de buiswand ter plaatse is te meten. (Hiermee wordt in de zomer van 2016 begonnen.)
- Onderzoek naar de interactie tussen buis en de omringende grond om een nauwkeuriger beeld te krijgen over het mechanisch bezwijken van betonnen buizen. (Dit onderzoek is onlangs gestart binnen het STW-TISCA-onderzoeksprogramma. Op initiatief van Stichting RIONED, TU Delft en de partners in het Kennisprogramma Urban Drainage zijn TU Eindhoven, TU Delft en Deltares hiermee aan de slag gegaan.)

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, 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 Breda en Den Haag, vandervalk+degroot, TU Eindhoven en Deltares voor hun actieve bijdrage aan en inzet voor het promotieonderzoek van Nikola Stanić.

- Van Bijnen, M., Korving, H., Clemens, F. 2012. *Impact of sewer condition on urban flooding: An uncertainty analysis based on field observations and Monte Carlo simulations on full hydrodynamic models*. Water Science and Technology 65 (12), pp. 2219-2227
- Clemens, F. H. L. R., Stanić, N., van der Schoot, W., Langeveld, J. G., & Lepot, M. (2015). *Uncertainties associated with laser profiling of concrete sewer pipes for the quantification of the interior geometry*. Structure and Infrastructure Engineering, 11(9), 1218-1239.
- Dirksen, J., Clemens, F. H. L. R., Korving, H., Cherqui, F., Le Gauffre, P., Ertl, T., Plihal, H., Müller, K., & Snaterse, C. T. M. (2013). *The consistency of visual sewer inspection data*. Structure and Infrastructure Engineering, 9, 214-228.
- Duran, O., Althoefer, K., & Seneviratne, L.D. (2003). *Pipe inspection using a laser-based transducer and automated analysis techniques*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 3, 401-409.
- Hager, W. H. (1999). "Wastewater hydraulics", Springer, Berlin.
- Korving, H. (2004). *Probabilistic assessment of the performance of combined sewer systems*. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Korving, H., & Clemens, F. (2004, November). *Reliability of coding of visual inspections of sewers*. Paper presented at the 4th International Conference on Sewer Processes and Networks, Funchal, Portugal.
- Stanić, N. (2016) *Assessment methods for structural and hydraulic properties of concrete sewer pipes*. Ph.D. Thesis Delft University of Technology, ISBN 978-94-6233-2058.
- Leidraad riolering, module C2100.
- Stichting RIONED, 2013. *Riool in cijfers 2013*.

Wetenschappelijke publicaties die uit het onderzoek zijn voortgekomen

Peer-Reviewed Journal Publications

- Stanić, N., de Haan, C., Tirion, M., Langeveld, J. G., & Clemens, F. H. L. R. (2013). *Comparison of core sampling and visual inspection for assessment of concrete sewer pipe condition*. Water Science and Technology, 67(11), 2458-2466.
- Stanić, N., Langeveld, J. G., & Clemens, F. H. L. R. (2014). *HAZard and OPerability (HAZOP) analysis for identification of information requirements for sewer asset management*. Structure and Infrastructure Engineering, 10(11), 1345-1356.
- Clemens, F. H. L. R., Stanić, N., Van der Schoot, W., Langeveld, J. G., & Lepot, M. (2015). *Uncertainties associated with laser profiling of concrete sewer pipes for the quantification of the interior geometry*. Structure and Infrastructure Engineering, 11(9), 1218-1239.
- Stanić, N., Langeveld, J. G., Salet, T., & Clemens, F. H. L. R. (2015). *Relating the structural strength of concrete sewer pipes and material properties retrieved from core samples*. Structure and Infrastructure Engineering: under review.
- Stanić, N., Clemens, F. H. L. R., Lepot, M., & Langeveld, J. G. (2015). *Estimation of hydraulic roughness of concrete sewer pipes by laser scanning*. Journal of Hydraulic Engineering: under review.
- Stanić, N., Lepot, M., Catieau, M., Langeveld, J. G., & Clemens, F. H. L. R. (2015). *A new and collaborative technology for sewer pipe inspection (Part 1): design, calibrations, corrections and potential application of a laser profiler*. Automation in Construction: under review.
- Lepot, M., Stanić, N., & Clemens, F. H. L. R. (2015). *A new and collaborative technology for sewer pipe inspection (Part 2): assessment of robustness and accuracy in laboratory*. Automation in Construction: under review.

Conference proceedings

- Stanić, N., Langeveld, J. G., & Clemens, F. H. L. R. (2012, September). *Identification of the information needs for sewer asset management by assessing failure mechanisms*. Paper presented at the 9th International Conference on Urban Drainage Modelling, Belgrade, Serbia.
- Stanić, N., de Haan, C., Tirion, M., Langeveld, J. G., & Clemens, F. H. L. R. (2012, September). *Comparison of core sampling and visual inspection for assessment of concrete sewer pipe condition*. Paper presented at the 9th International Conference on Urban Drainage Modelling, Belgrade, Serbia.
- Stanić, N., van der Schoot, W., Kuijper, B., Langeveld, J. G. & Clemens, F. H. L. R. (2013, August). *Potential of laser scanning for assessing structural condition and physical roughness of concrete sewer pipes*. Paper presented at the 7th International SPN Conference, Sheffield, UK.
- Stanić, N., Langeveld, J. G., & Clemens, F. H. L. R. (2014, September). *Potential of laser scanning for quantification of sediment deposits in sewer*. Paper presented at the 13th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage, Kuching, Malaysia.
- Stanić, N., Salet, T., Langeveld, J. G., & Clemens, F. H. L. R. (2014, September). *Design of a laboratory set-up for evaluating structural strength of deteriorated concrete sewer pipes*. Paper presented at the 13th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage, Kuching, Malaysia.
- van Riel, W. A. P., Stanić, N., Langeveld, J. G., & Clemens, F. H. L. R. (2014, October). *Pipe quality information in sewer asset management: Use and uncertainties*. Paper presented at the 9th World Congress on Engineering Asset Management, Pretoria, South Africa.
- Lepot, M., Stanić, N., Catieau, M., & Clemens, F. H. L. R. (2015, September). *Laser profiling: a promising technique to accurately assess pipe state and roughness*. Paper presented at the 10th International Urban Drainage Modelling Conference, Mont Saint-Anne, Canada.

Nederlandstalige publicaties

- Stanić, N., Langeveld, J. G., & Clemens, F. H. L. R. (2012). *Identificatie van de benodigde informatie voor het beoordelen van faalmechanismen bij het rioleringsbeheer*. WT Afvalwater, 12(4), 293-302.
- Stanić, N., de Haan, C., Tirion, M., Langeveld, J. G., & Clemens, F. H. L. R. (2013). *Een vergelijking van boorkernen-analyse en visuele inspectie ter beoordeling van de conditie van rioolbuizen*. WT Afvalwater, 13(1), 9-18.

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.

© 2016 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.

auteurs

François Clemens, Hoogleraar Riolering, TU-Delft

Jeroen Langeveld, Directeur Kennisprogramma Urban Drainage, TU-Delft

tekstadvies

Karlijn Kunst

vormgeving

Jelle de Gruyter, gaw ontwerp+communicatie b.v., Wageningen

druk

Drukkerij Modern b.v., Bennekom

rapportnummer

2016-06

isbn/ean

978 90 5773 704 6

Deze Nederlandstalige samenvatting van het proefschrift *Assessment methods for structural and hydraulic properties of concrete pipes* van Nikola Stanić beschrijft de toepasbaarheid van enkele technieken voor de toestandsbepaling van betonnen riolen. Stanić onderzocht het nut van boorkernen en verbeterde de methodiek voor inspectie van betonnen riolen met een laser-profiler.

ISBN/EAN 978 90 5773 704 6

