

BTO 2019.010 | Maart 2019

BTO rapport

Röntgentomografie als
meetmethode voor
toestandsbepaling van
asbestcementleidingen

BTO

Röntgentomografie als meetmethode voor toestandsbepaling van asbestcementleidingen

BTO 2019.010 | Maart 2019

Opdrachtnummer

402045/092

Projectmanager

drs. P.G.G. (Nellie) Slaats

Opdrachtgever

BTO - Verkennend onderzoek

Kwaliteitsborger(s)

dr. P. (Peter) van Thienen

Auteur(s)

dr. ir. K.A. (Karel) van Laarhoven, dr. J.R.G. (Joost)
van Summeren

Verzonden aan

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.
Een jaar na publicatie is het openbaar.

Jaar van publicatie
2019

Meer informatie

dr. ir. Karel van Laarhoven
T +31 30 6069697
E karel.van.laarhoven@kwrwater.nl

Keywords

asbestcement, CT conditiebepaling,
uitloging, degradatie

Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl



BTO 2019.010 | Maart 2019 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

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

BTO Managementsamenvatting

Degradatie van asbestcementbuizen perfect in beeld met CT-scans

Auteur(s) dr. ir. Karel van Laarhoven en dr. Joost van Summeren

Röntgentomografie (CT of computertomografie) kan de degradatie van asbestcementbuizen zeer nauwkeurig in beeld brengen. Vergelijking met de gangbare technieken thymolftaleïne en georadar laat zien dat CT goed overeenkomt met thymolftaleïne en dat georadar de aantasting van AC buizen systematisch onderschat. CT zal waardevol zijn als referentie voor de validatie van andere technieken en kan gebruikt worden voor conditiebepaling wanneer extra zekerheid en detail gewenst zijn.



Eén CT scan maakt honderden doorsneden van een buis; daarin is aantasting duidelijk zichtbaar als donkere vlekken.

Belang: prioriteren vervanging AC leidingen

Nog ruwweg 25% van het drinkwatertransport- en distributienet bestaat uit asbestcement (AC). Drinkwaterbedrijven willen AC leidingen de komende decennia vervangen. Om de slechtste leidingen het eerst te kunnen vervangen hebben ze goede methoden voor het bepalen van de toestand van AC nodig. Een nieuwe methode, röntgentomografie (CT), biedt mogelijkheden.

Aanpak: CT-beelden vertaald naar getallen; vergelijking met thymolftaleïne en georadar

Met eenvoudige beeldverwerkingsstappen worden CT-scans van uitgenomen AC-buizen vertaald naar getallen die bruikbaar zijn voor verdere analyse. Daarna wordt onderzocht of de degradatie van de gescande buizen statistisch kan worden beschreven. Tenslotte wordt de techniek vergeleken met twee gangbare conditietesten: thymolftaleïne en georadar.

Resultaten: CT geeft compleet beeld, georadar onderschat degradatie

De CT-beelden geven een ongekend compleet en gedetailleerd beeld van de degradatie van

uitgenomen asbestcementbuizen. Het is goed haalbaar om de beelden geautomatiseerd te vertalen naar getallen om de toestand van de buis samen te vatten en om de uitslagen van CT te vergelijken met die van andere technieken. Bij die vergelijking bleek dat georadar degradatie systematisch onderschat en dat CT-data goed overeenkomen met thymolftaleïne metingen.

Implementatie: CT is waardevol voor validatie en kan extra zekerheid bieden

CT is vooral waardevol als referentie voor het valideren van andere technieken. Incidenteel gebruik als toestandsbepaling is denkbaar voor projecten die extra zekerheid vergen. Omdat georadar degradatie systematisch onderschat, is het verstandig om deze techniek nader te onderzoeken vóór drinkwaterbedrijven overgaan op brede toepassing van deze techniek.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Röntgentomografie als meetmethode voor toestandsbepaling van asbestcementleidingen* (BTO-2019.010).

Inhoud

Inhoud	1
1 Inleiding	2
1.1 Aanleiding	2
1.2 Doel	2
1.3 Aanpak	2
1.4 Leeswijzer	2
2 Röntgen metingen aan asbestcementleidingen	3
2.1 Röntgentomografie	3
2.2 Röntgentomografie en asbestcement	3
2.3 Praktische overwegingen bij het meten aan asbestcement	3
2.4 Specificaties CT metingen	4
2.5 Voorbeelddata en interpretatie	4
2.6 Vorm van CT data	5
2.7 Beeldverwerking van meetresultaten	5
2.8 Discussie beeldverwerking	8
3 Statistische analyse van CT uitlogingsdata	10
3.1 Inleiding	10
3.2 Resolutie, nauwkeurigheid en rekentijd	10
3.3 Visuele interpretatie van uitlogingspatronen	11
3.4 Statistische analyse	12
4 Vergelijking met andere technieken	17
4.1 Inleiding	17
4.2 Vergelijking CT met indicatormetingen	17
4.3 Vergelijking CT met radarmetingen	20
5 Conclusies, aanbevelingen en openstaande vragen	24
5.1 Conclusies	24
5.2 Aanbevelingen	24
6 Literatuur	27
Bijlage I	29
BLERICK-4 (Uitlogingstype H0)	29
BLERICK-03 (Uitlogingstype H0)	30
D09586-1 (Uitlogingstype II)	31

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Nog ruwweg 25% van het drinkwatertransport- en distributienet bestaat uit asbestcement (AC). Leidingen van dit materiaal storen relatief vaak. Hierom, en vanwege de aanwezigheid van asbest in dit materiaal, hebben AC leidingen bij de drinkwaterbedrijven een hoge prioriteit om vernieuwd te worden. Op basis van de huidige snelheid (maximaal 1-2% van het totale net per jaar) en de prevalentie strategie (meegaan met derden) waarmee het net wordt vernieuwd, moet echter verwacht worden dat AC nog decennia in het net voor zal komen. Het is daarom extra belangrijk om de toestand van AC leidingen te kunnen meten of voorspellen, zodat de slechtste leidingen het eerst vervangen kunnen worden.

Een belangrijk degradatiemechanisme van AC buizen is uitloging: het geleidelijk oplossen van de cementcomponenten van het leidingmateriaal in het drinkwater en/of het grondwater. In 2017-2018 hebben de drinkwaterbedrijven binnen het BTO sterkteproeven op AC buizen laten uitvoeren om meer te weten te komen over de invloed van uitloging op de sterkte-eigenschappen van een buis. Daarbij deed zich onverwacht de gelegenheid voor om de buizen door te meten met röntgen computertomografie (CT).

1.2 Doel

In dit onderzoek wordt onderzocht hoe uitloging van AC leidingen op basis van CT-beelden van deze leidingen gekwantificeerd kan worden om een groter begrip van de degradatie van AC te verkrijgen.

1.3 Aanpak

Het project is verkennend van aard, want deze meettechniek is nog maar zelden toegepast op AC en helemaal niet in Nederland. Het onderzoek richt zich op de volgende vragen:

- Hoe zijn CT-scans inzetbaar als nieuwe methode om uitloging te meten en beter te begrijpen?
- Hoe verhouden de resultaten van de CT-scans zich tot de resultaten van geselecteerde andere inspectietechnieken en hoe zijn ze aan elkaar te koppelen?

Met de antwoorden op deze vragen krijgen de drinkwaterbedrijven handvatten om de prioritering van het vernieuwen van AC leidingen nog beter te onderbouwen. Het is denkbaar dat de ervaring die in dit project wordt opgedaan met röntgenmetingen aan AC in de toekomst overdraagbaar is naar andere – al dan niet cementshoudende – leidingmaterialen, zodat ook daarover nieuwe inzichten worden verkregen.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt beschreven hoe degradatie van AC met CT gemeten kan worden. In hoofdstuk 3 wordt beschreven hoe de degradatie van een buisdeel statistisch gekarakteriseerd kan worden op basis van CT metingen. In hoofdstuk 4 worden de resultaten van de CT-techniek vergeleken met die van gangbare metingen met georadar en thymolftaleïne. Hoofdstuk 5 vat de belangrijkste bevindingen van deze studie samen.

2 Uitlogingsprofielen van asbestcementleidingen met Röntgentomografie

2.1 Röntgentomografie

Het principe achter röntgentomografie is dat de meeste materialen röntgenstraling niet tegenhouden, maar wel verzwakken op een manier die zeer specifiek is voor het bestraalde materiaal. Door vanuit verschillende hoeken te meten, kan de materiaalopbouw in een dwarsdoorsnede van een object worden gereconstrueerd. Door vele dwarsdoorsnedes te meten, wordt de materiaalopbouw van het volledige object driedimensionaal beschreven. Er is een veelvoud aan nobelprijzen uitgereikt rond de ontwikkeling van röntgentomografie en het is nog steeds een van de belangrijkste moderne medische inspectietechnieken.

2.2 Röntgentomografie en asbestcement

Hoewel de ontwikkeling van CT gedreven is door de medische wereld, is de techniek ook toepasbaar op andere materialen, zoals bouwmaterialen. De techniek kan bijvoorbeeld ook specifiek gekalibreerd worden om de verschillende bestanddelen van cement te identificeren [Aruntas et al., 2010; Wan et al., 2015]. In de literatuur is al eens een proof-of-principle beschreven dat liet zien dat cement en uitgelopen cement op die manier van elkaar kunnen worden onderscheiden [Wan et al., 2012]. Er is vooralsnog geen wetenschappelijke literatuur beschikbaar over de toepassing van CT op asbestcementleidingen. Wel wordt het toepassen van de techniek op belangrijke leidingen genoemd in tenminste één internationale best practice guide [Water New Zealand, 2017].

2.3 Praktische overwegingen bij het meten aan asbestcement

Niet alle meettechnieken voor toestandsbepaling van AC zijn aan de sleuf uitvoerbaar (thymolftaleinetesten bijvoorbeeld wel, maar schedeldrukproeven bijvoorbeeld niet). Voor laboratoriumproeven aan AC buizen geldt doorgaans dat deze bemoeilijkt worden door veel extra voorzorgsmaatregelen die vereist zijn voor het werken met asbesthoudend materiaal. CT-metingen bieden hier een praktisch voordeel: de metingen zijn niet destructief en de buizen kunnen worden doorgemeten terwijl ze luchtdicht verpakt zijn. Mits de kwaliteit van de verpakking gegarandeerd is, zijn daardoor in principe geen bijzondere faciliteiten met betrekking tot asbest nodig in het lab. Omdat Een buis is voldoende verpakt wanneer deze [Water New Zealand, 2017, TU Delft, 2018]:

- herkenbaar gelabeld is;
- voorzien is van waarschuwingstickers omtrent asbesthoudend materiaal;
- voorzien is van noppenfolie of een andere bedekking van scherpe randen om scheuren van de verpakking te voorkomen;
- luchtdicht en dubbel is verpakt in zware plastic zakken zonder gaten.

Deze lijst is uitgebreider dan de verpakking voor verwijderde AC buisdelen die wordt beschreven in het 'rode boekje' [VEWIN et al., 2010] omdat het de buizen niet direct worden afgevoerd maar in een laboratorium omgeving worden geïntroduceerd.

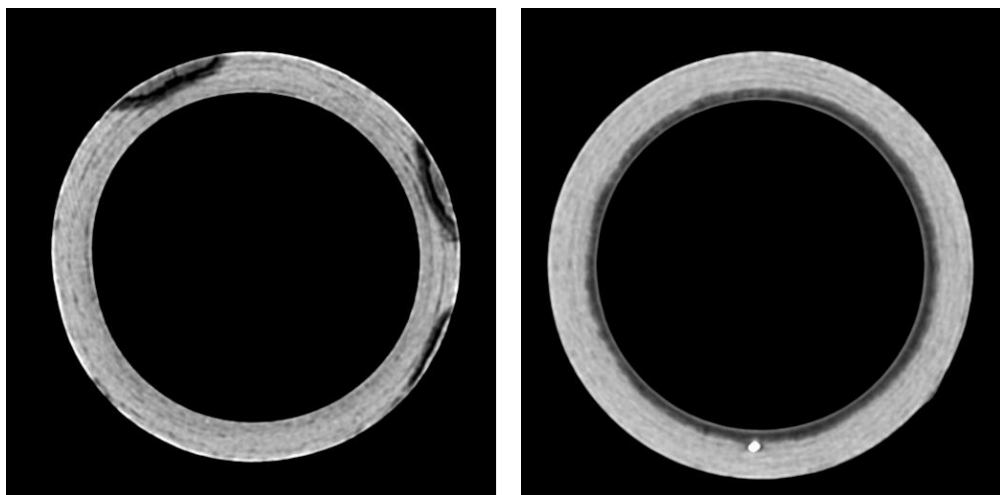
Op dit moment zijn bovendien verschillende draagbare CT scanners verkrijgbaar [e.g. GE healthcare, 2019]. Het is daarmee te verwachten dat een oplossing 'aan de sleuf' technisch haalbaar zou zijn met de nodige ontwikkelstappen, indien gewenst.

2.4 Specificaties CT-metingen

De CT-data die in het huidige project zijn gebruikt zijn verkregen met een medische scanner van het type Siemens Somatom Definition. De bundel was ingesteld op 250 mA en 140 kVp. Verder was de scanner ingesteld op een pitch van 0,6 mm, een rotatietijd van 0,5 mm en een B50f kernel. Hiermee werd over iedere 1,5 mm een doorsnede gemeten met een Field of View van 150 mm x 150 mm en een resolutie van 512 pixels in iedere richting. In totaal zijn 32 (ongecoate) buisdelen met een lengte van ongeveer 1 m gescand. Deze buizen waren ook de proefstukken in sterkteproeven die zijn uitgevoerd in het kader van het BTO 2017; verdere informatie over de proefstukken is opgenomen in [Beuken en Van Laarhoven, 2019].

2.5 Voorbeelddata, interpretatie en relatie met uitloging

Een voorbeeld van twee buisdoorsneden is weergegeven in Figuur 1. Beide figuren zijn opgebouwd uit 512x512 pixels met ieder een karakteristieke grijswaarde (0 = zwart, 3310 = wit). Eén pixel in deze figuur representeert een oppervlak van 0,29x0,29 mm². De scan van één buisdeel produceert ongeveer 700 doorsneden en meet daarbij steeds over een schijf van 1,5 mm dikte. De grijswaarde van een pixel geeft daarmee informatie over de materiaalopbouw van een volume elementje van het AC met een afmeting van 0,29x0,29x1,5 mm³.



Figuur 1. CT-doorsneden van een aangetaste AC buis. Links: een doorsnede van een inhomogeen aangetaste buis (ID 103679). De drie donkere vlekken wijzen op een materiaal- verandering die gepaard ging met een verlaging van de dichtheid ten opzichte van het onaangetaste materiaal. Rechts: een doorsnede van een homogeen aangetaste buis (ID BLERICK-01).

Wanneer het volume-elementje van een pixel meerdere materialen bevat, zal de grijswaarde van het elementje bepaald worden door een volume gewogen gemiddelde van de karakteristieke materiaalwaarden. Dit is zeker van toepassing voor de huidige metingen, want cement is opgebouwd uit verschillende soorten zoutkristallen en

andere structuren die vele malen kleiner zijn dan een volume-element van 0,29x0,29x1,5 mm. Cement bevat bovendien microporiën waarin lucht of water aanwezig is.

Wanneer het cement in een volume-elementje uitloogt, wordt in de eerste plaats calciumhydroxide ingeruild voor water. De gemiddelde grijswaarde waarde van het volume-elementje daalt daardoor, waardoor de uitloging meetbaar wordt. Deze eerste stap in het uitlogingsproces is typisch verantwoordelijk voor het overgrote deel van toename in porositeit en afname in sterkte (Carde et al., 1999). Daarnaast geldt dat de overgang van materiaal met en zonder calciumhydroxide typisch een front vormt, dus het is te verwachten dat de belangrijkste overgang van sterk naar zwak materiaal scherp afgetekend zal zijn in de CT beelden. In Figuur 1 heeft het gedegradeerde AC grijswaarden van ongeveer 1700-2200 en heeft intact AC grijswaarden van ongeveer 2500-2900. De overgang van aangetast naar niet aangetast materiaal is daardoor goed herkenbaar in de CT beelden.

Tijdens uitloging en chemische degradatie geldt dat er ook nieuwe materialen kunnen neerslaan in het gedegradeerde cement vanwege reacties met het aanvallende medium, zoals de calciumcarbonaatlaagjes die zich kunnen afzetten in reactie met drinkwater met een hoge SI. Ook deze veranderingen van het bulk materiaal zullen zich in het signaal van de CT-beelden manifesteren. Dit is een mogelijke verklaring voor de lichtere vlekken binnen de gedegradeerde gebieden in Figuur 1.

2.6 Vorm van CT-data

Ruwe CT-data van medische scanners wordt typisch opgeslagen als .DCM (Digital imaging and Communications in Medicine) formaat, een containerbestand voor de beelden en de metadata van de meting. Deze data kan geïnspecteerd worden met de geavanceerdere beeldverwerkingsprogramma's, zoals Adobe Photoshop of ImageJ. Producenten van CT-scanners leveren doorgaans software die gebruikt kan worden om de afzonderlijke doorsneden te aggregeren tot een driedimensionaal model voor extra weergavemogelijkheden.

De grijswaarden van de pixels in een CT beeld worden typisch getransformeerd naar de *Hounsfieldschaal*. Dit is een lineaire schaal die gebruikt wordt om materialen in CT beelden te identificeren. De schaal wordt gekalibreerd op het signaal van lucht (gesteld op een waarde van -1000) en water (gesteld op een waarde van 0). Hogere waarden komen overeen met stoffen die steeds minder transparant zijn voor röntgenstraling. Het is daarbij belangrijk om op te merken dat verschillende materialen verschillend reageren op verschillende doses straling. Dit betekent dat een Hounsfieldschaal niet universeel is, maar altijd hoort bij de specifieke instellingen van de scanner waarop deze is gekalibreerd. Binnen een gekalibreerde schaal hebben materialen echter een zeer karakteristieke waarde waardoor onderscheid en identificatie mogelijk zijn.

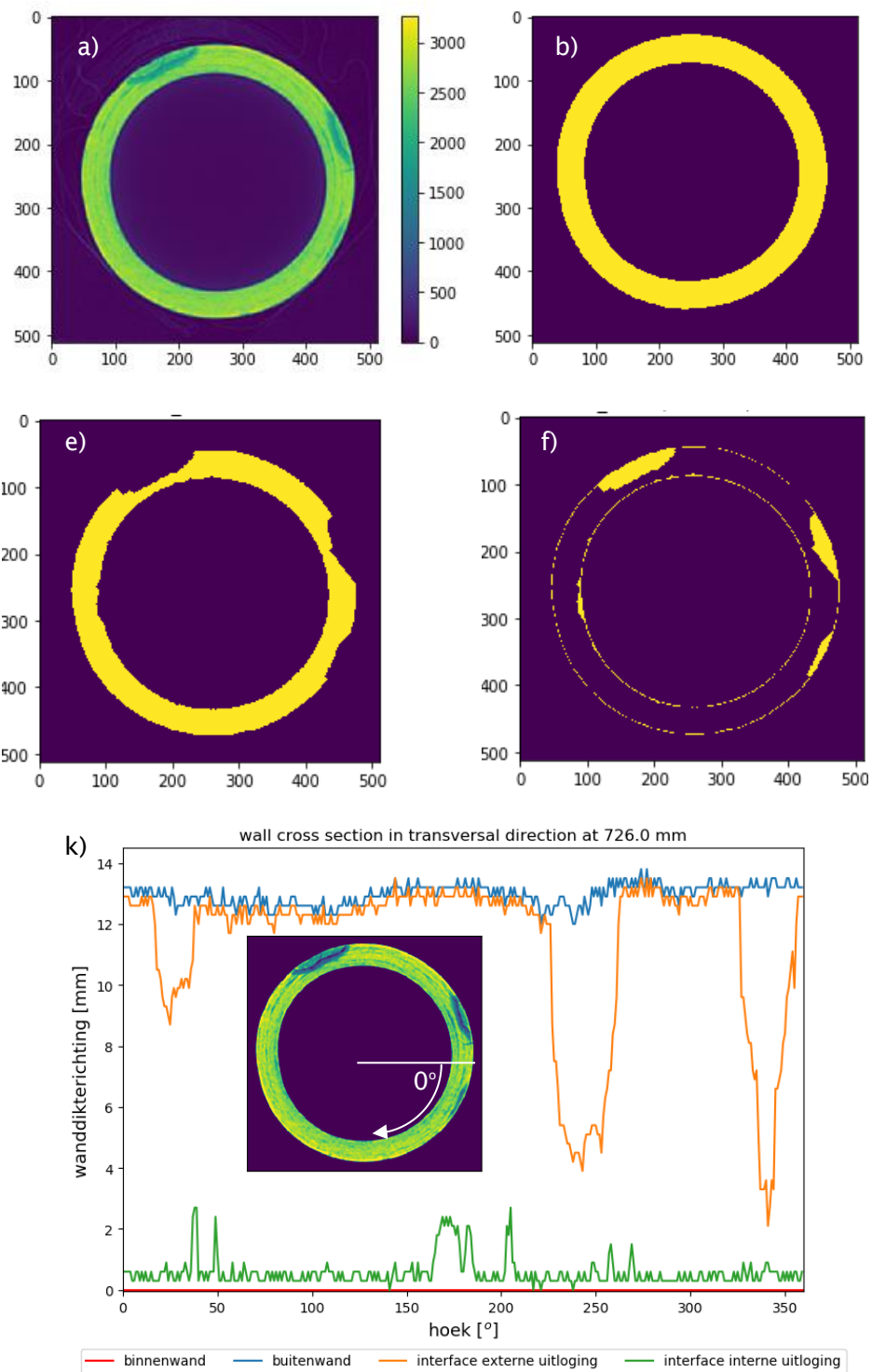
2.7 Beeldverwerking van meetresultaten

Om te kunnen rekenen aan de degradatie van de doorgemeten buisdelen is het nodig om de CT-beelden te vertalen naar getallen. In de medische wereld zijn allerlei softwarepakketten beschikbaar die weefselstructuren en dergelijke kunnen identificeren en kwantificeren. Voor het veel specifiekere toepassingsgebied van bouwmaterialen zijn dergelijke pakketten niet commercieel beschikbaar. Onderzoekers op dit gebied werken typisch met zelfgemaakte scripts die zijn toegespitst op het specifieke onderwerp. Voor de verwerking van de beelden in dit project is met behulp van Python 2.7 een beeldverwerkingsalgoritme opgesteld. Het algoritme zet met behulp van enkele basale

beeldverwerkingsstappen een plaatje zoals dat in Figuur 1 om naar een wanddikte-profiel over de omtrek. De stappen van het algoritme (geïllustreerd in Figuur 2) zijn:

- a) Lees één CT-doorsnede van de buis in als figuur.
- b) Bepaal in de originele figuur het silhouet van de AC buis door grijswaarden lager dan parameter **C1** op 0 en waarden hoger dan **C1** op 1 te stellen. Selecteer het grootste object dat in de figuur overblijft als de buis.
- c) Bepaal in de originele figuur het silhouet van het AC dat niet uitgeloozd is door grijswaarden lager dan parameter **C2** op 0 en waarden hoger dan **C2** op 1 te stellen. Selecteer het grootste object dat in de figuur overblijft als het niet uitgeloozdde AC.
- d) Verfijn het resultaat uit b) door dit silhouet achtereenvolgens **C3** keer te eroderen¹(een laag pixels weggooien aan de randen van het object), eventuele hierdoor losgeknipte objecten met een oppervlak van minder dan **C4** pixels weg te gooien, en de overgebleven objecten **C3** keer te dilateren¹ (een laag pixels toevoegen aan de randen van het object). Deze operatie filtert kleine lichte plekken uit de extern-uitgeloozdde delen die anders voor het uitlogingsfront zouden kunnen worden aangezien.
- e) Verfijn het resultaat uit c) door het silhouet **C5** keer te dilateren en vervolgens **C5** keer te eroderen. Deze operatie dient voornamelijk om te voorkomen dat kleine onregelmatigheden in de grijswaarden van het AC worden geïdentificeerd als uitloging.
- f) Trek het resultaat uit d) af van het resultaat uit a) om een silhouet van alleen de uitgeloozdde delen van de buis te krijgen.
- g) Bepaal het middelpunt van de buis in de figuur door het massamiddelpunt te nemen van het silhouet uit a).
- h) Trek vanuit het middelpunt onder een bepaalde hoek een lijn over het silhouet uit a) en bepaal het pixelprofiel van het plaatje over die lijn. Bepaal hieruit de nominale wanddikte.
- i) Trek vanuit het middelpunt onder een bepaalde hoek een lijn over het silhouet uit f) en bepaal het pixelprofiel van het plaatje over die lijn. Bepaal hieruit de dikte van inwendige en uitwendige uitloging.
- j) Herhaal stappen g) en h) voor meerdere hoeken om een omtrekprofiel van de restwanddikte te verkrijgen en sla deze data op.
- k) Herhaal stappen a) tot en met j) voor alle CT-doorsneden van de buis en sla de data op om het volledige uitlogingsprofiel van de buis te verkrijgen.

¹ *Erosie* is een mathematisch morfologische operator waarbij een structurelement wordt gebruikt voor het doen krimpen van (de voorgrond van) het beeld. Het binaire geërodeerde beeld is de groep van punten waarop een superpositie van het structurelement gecentreerd op het punt geheel volledig uit positieve beeldelementen bestaat. *Dilatatie* is te zien als de inverse operator van erosie, waarbij het beeld op de voorgrond expandeert. Een evaluatiepunt wordt positief (tot het voorgrondbeeld) gerekend als enig punt in het structurelement gecentreerd op het evaluatiepunt positief is.
(https://docs.scipy.org/doc/scipy-0.14.0/reference/generated/scipy.ndimage.morphology.binary_erosion.html,
https://docs.scipy.org/doc/scipy-0.14.0/reference/generated/scipy.ndimage.morphology.binary_dilation.html,
https://en.wikipedia.org/wiki/Mathematical_morphology).



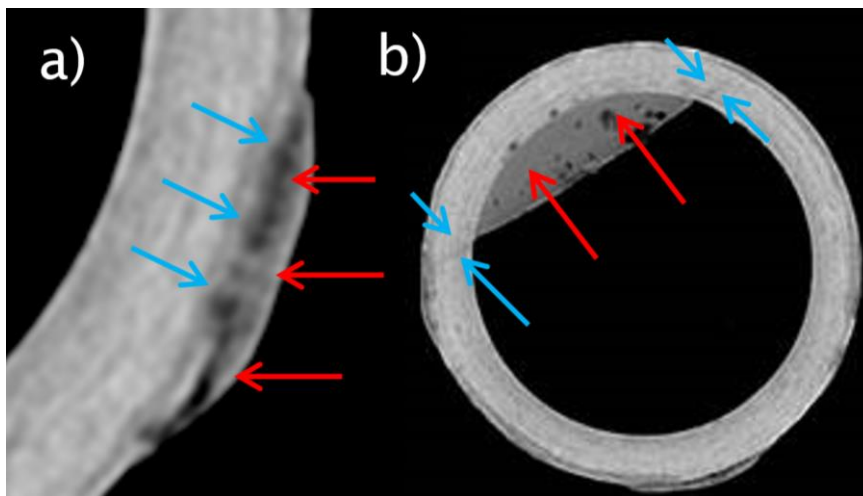
Figuur 2. Stappen in het beeldverwerkingsalgoritme. (a): CT-scan (doorsnede in omtrekriching) met grijswaarden zoals aangegeven met de kleurschaal. (b): silhouet van het buismateriaal. (c): silhouet van het buismateriaal dat niet is aangetast. (d): silhouet van het aangetaste buismateriaal. (e): het gedigitaliseerde degradatieprofiel met wanddikte, inwendige en uitwendige aantasting als functie van de hoek. Het plaatje geeft het begin en de richting van de horizontale as aan. De belettering is consistent met paragraaf 2.7

2.8 Discussie beeldverwerking

Bovenstaand algoritme kan op veel punten worden verfijnd om beter om te kunnen gaan met bijzondere situaties die zich kunnen voordoen in een CT doorsnede. De huidige aanpak maakt gebruik van enkel de meest basale beeldverwerkingsstappen. Deze aanpak is echter robuust genoeg om het grootste gedeelte van de CT doorsneden van één doorgemeten buis correct te verwerken. Bovendien is het algoritme robuust genoeg om de data van verschillende buizen te verwerken zonder de parameters van het algoritme uitvoerig op iedere buis aan te passen. Uitloging wordt daardoor voor alle buizen via dezelfde criteria bepaald, waardoor een consistente vergelijking mogelijk is. In dit onderzoek zijn de volgende parameters gebruikt voor het analyseren van de buizen:

- C1 = een grijswaarde van 1500
- C2 = een grijswaarde van 2400
- C3 = 3
- C4 = een oppervlakte van 200 pixels
- C5 = 15

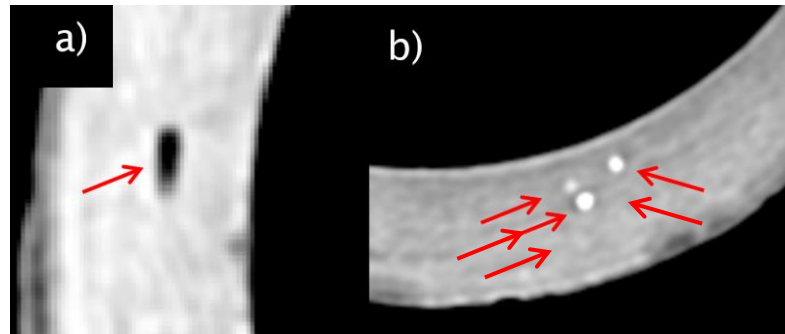
In een aantal CT-scans veroorzaakt de aanwezigheid van bijvoorbeeld zand of plastic plaatselijk vervorming van het beeld waarbij de schijnbare mate van uitloging *in* het leidingmateriaal wordt beïnvloed (zie Figuur 3). Dit kan de beeldanalyse verstoren. Dergelijke problemen zouden kunnen worden opgevangen in de beeldverwerking, maar kunnen veel makkelijker worden voorkomen door buisdelen schoon te maken voorafgaand aan het uitvoeren van de scan.



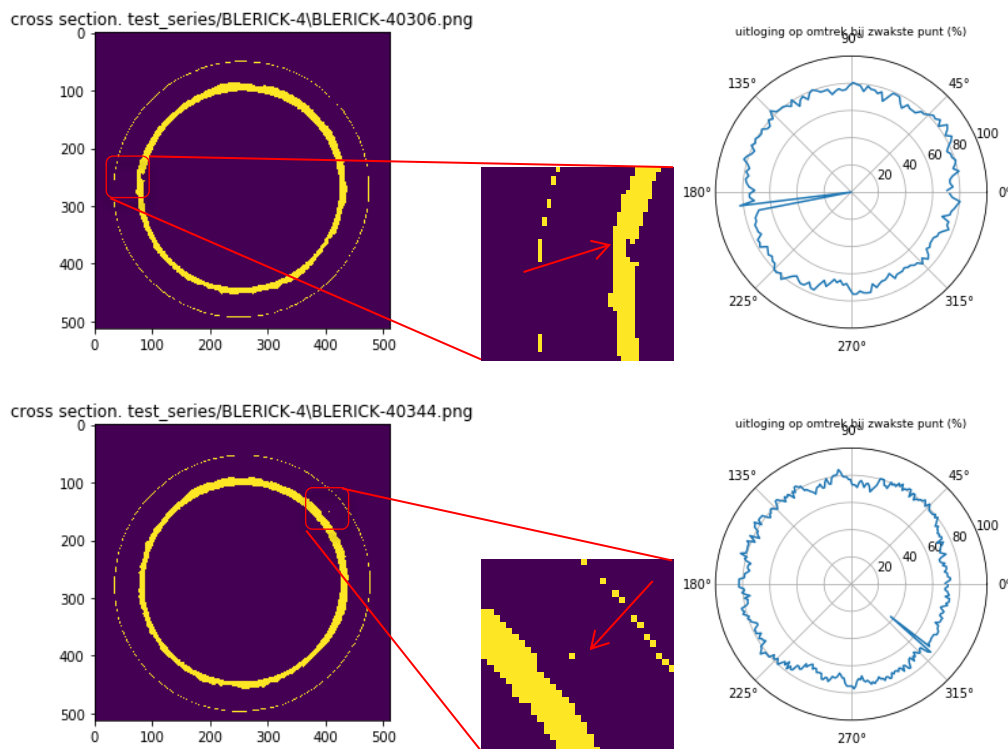
Figuur 3. Verstoring van het CT-beeld (blauwe pijlen) vanwege materiaal buiten de leidingwand (rode pijlen). a) materiaal aan de buitenkant van de leidingwand met een schijnbaar vervormd beeld in de leiding, b) idem, voor materiaal aan de binnenkant van een leiding.

In verschillende buizen treden af en toe scherpe, ingesloten oneffenheden in grijswaarden op. Donkere plekken (Figuur 4a) hangen mogelijk samen met loslatende asbestcementwikkels of andere ingesloten holten. Tot een ingestelde grootte worden deze gaten automatisch opgevuld door het algoritme. Grotere gaten of onvolkomenheden zullen de beeldanalyse echter verstoren (Figuur 5). Dergelijke verstoringen bleken in deze studie echter zeldzaam, en zijn met de hand verwijderd in plaats van het algoritme verder te stroomlijnen om hier automatisch mee om te gaan.

Er komen ook lichte plekken voor de in de buiswand (Figuur 4a). Deze hangen waarschijnlijk samen met ingesloten materialen met een hoge radiodichtheid, zoals kleine metaaldeeltjes. Deze zullen worden met het huidige algoritme geïnterpreteerd als niet-uitgeleegd materiaal en zullen niet tot een relevante verstoring van het uitlogingsbepaling leiden.



Figuur 4. Lokaal afwijkende grijswaarden in de CT-scans. a) Donkere en b) lichte plekken.



Figuur 5. Anomaliën die tot een verstoorde beeldanalyse leiden. Boven: de figuur links toont uitloging in geel op de hele buiswand. Plaatselijk bevindt zich in radiële richting een niet-uitgeleegd gebied binnen het gebied van interne uitloging (rode pijl). Deze situatie leidt lokaal tot een onterechte restwanddikte van 0 mm (figuur rechts, rond 185°). Onder: Een verstoorde buiswikkels middenin de buiswand wordt onterecht geïnterpreteerd als uitgeleegd materiaal. Hierdoor wordt een verkeerde restwanddikte toegekend (rechts, rond 320°).

3 Statistische analyse van uitlogingsbepalingen op basis van CT

3.1 Inleiding

Eerder onderzoek met pH-indicatoren en georadar heeft uitgewezen dat het uitlogingspatroon van één buisdeel al veel variatie kent over zowel de omtrek als in de lengterichting van de buis. De mate van uitwendige uitloging in AC-leidingen kent vaak meer ruimtelijke variatie dan de mate van inwendige uitloging [Sterk en Van de Lisdonk, 1999; Mesman, 2001, Beuken, 2016]. Dergelijke verschillen worden verklaard vanuit de verschillen in contact met agressieve stoffen binnen en buiten de buis (zie bijvoorbeeld Beuken [2015] voor een overzicht).

Vanwege de inhomogeen verdeelde uitloging is het moeilijk om het zwakste punt in de wand te vinden met een enkele meting. Om een statistisch betrouwbaar uitspraak te doen over de leidingconditie is een groot aantal bepalingen nodig [Mesman, 2001, Mesman en van de Wielen, 2005]. Op basis van thymolftaleïne-testen op 250 buisdelen in het WML-gebied wordt het nut van een pH-indicator voor een representatieve toestandsbepaling zelfs in twijfel getrokken, tenzij er een steekproef wordt uitgevoerd van voldoende omvang (Beuken, 2016). In de praktijk is het aantal beschikbare leidingdelen meestal beperkt tot 5 per leiding en wordt geen statistisch significant resultaat behaald.

In hoofdstuk 2 is beschreven hoe uit CT-scans de uitloging over het volledige wandoppervlak van een buis met hoge resolutie kan worden bepaald. In dit hoofdstuk zijn de CT-scans onderworpen aan een visuele en statistische analyse om te onderzoeken of en hoe de informatie hieruit bestaande methoden kan aanvullen of verbeteren. Hierin staan de volgende vragen centraal:

- Hoe is uitloging verdeeld over een buisdeel? Welke resolutie van bemonstering is nodig voor een voldoende nauwkeurige bepaling van de gemiddelde en minimum restwanddikte? Wat betekent dit voor de informatie die wordt verkregen uit pH-indicator-tests of radarmetingen?
- Zijn interne en externe uitloging statistisch van elkaar te onderscheiden?
- Zijn typische uitlogingspatronen statistisch herkenbaar en met welke parameters zijn deze kwantitatief te beschrijven?

3.2 Resolutie, nauwkeurigheid en rekentijd

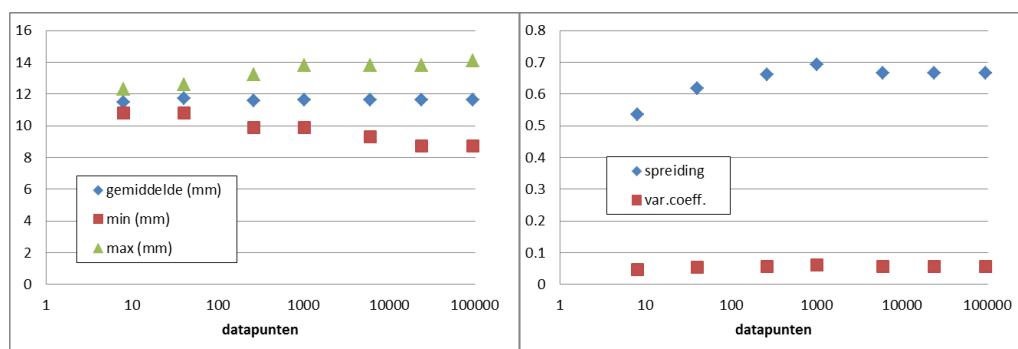
De invloed van de ruimtelijke resolutie van de beeldanalyse op de nauwkeurigheid van het resultaat is onderzocht met een resolutietest. Dit geeft tevens inzicht in de rekentijden van het algoritme en hoe de CT-scans zich verhouden tot andere methoden zoals georadar of pH-indicatormethoden. Hiertoe is voor buisdeel (BLERICK-4) de restwanddikte bepaald (μ , σ , λ , MIN en MAX) bij een toenemend aantal datapunten zoals aangegeven in Tabel 1. Uit de analyseresultaten (Tabel 1, Figuur 6) wordt het volgende afgeleid:

- De waarden voor gemiddelde (μ) spreiding (σ) en variatiecoëfficiënt (λ) van de restwanddikte convergeren met toenemende resolutie. Een resolutie van ca. 66x90 (ca. 6 mm in de lengterichting en 7 mm in de omtrekriching) resulteert in een onnauwkeurigheid van <0,1% in μ , σ en λ .
- De MIN- en MAX-waarden convergeren minder snel en minder glad met toenemende resolutie (in vergelijking tot de waarden uit bovenstaand punt). Voor deze extreme waarden bestaan in principe geen grenzen voor statistische significantie: immers, als een lokaal extreme waarde bij een verhoging van resolutie voor het eerst wordt opgelost, dan heeft dit een direct effect op de extreme waarde. Het bestaan van niet-opgeloste lokale extrema is dus altijd mogelijk.
- De rekentijd neemt ongeveer lineair toe met het aantal datapunten (in de niet-geoptimaliseerde onderzoekstoel ongeveer 1000-2000 datapunten per minuut).

Op basis van bovenstaande bevindingen is gekozen om een resolutie van 66x90 wanddiktebepalingen (ca. 6 mm in de lengterichting en 7 mm in de omtrekriching) te gebruiken in de overige beeldanalyses van dit hoofdstuk. Dit geeft een voldoende goed beeld van het uitlogingspatroon en beperkt de rekentijd tot ca. 2 minuten.

Tabel 1. Resolutietest voor buisdeel BLERICK-4 (frame 100 t/m 360). M en N zijn het aantal doorsnedes in de omtrek- en lengterichting, respectievelijk. De bijbehorende resoluties zijn weergegeven met m en n. De resultaten (grijze kolommen) zijn bepalingen van het niet-uitgeleogde AC (restwanddikte).

M	m (mm)	N	n (mm)	# data	μ (mm)	σ (mm)	λ	MIN (mm)	MAX (mm)
2	390.0	4	157.1	8	11.47	0.54	0.047	10.8	12.3
5	97.5	8	78.5	40	11.70	0.62	0.053	10.8	12.6
11	39.0	24	26.2	264	11.60	0.66	0.057	9.9	13.2
21	19.5	48	13.1	1008	11.62	0.69	0.060	9.9	13.8
66	6.0	90	7.0	5940	11.62	0.67	0.057	9.3	13.8
131	3.0	180	3.5	23580	11.62	0.67	0.057	8.7	13.8
261	1.5	360	1.7	93960	11.62	0.67	0.058	0.0	14.1



Figuur 6. Grafische weergave van de resultaten van de resolutietest uit Tabel 1.

3.3 Visuele interpretatie van uitlogingspatronen

Tabel 2 geeft een overzicht van uitlogingspatronen op basis van visuele waarneming van de CT-scans. Voor de analyseerbare buisdelen is de mate van uitloging aangegeven (geen waarde = niet of nauwelijks uitgeleogd, 1 = matig uitgeleogd; 2= sterk

uitgeloogd) en of de uitloging homogeen of inhomogeen is verdeeld. Het uitlogingstype is samengevat (kolom 'type uitloging') met een tweeletter-code, zoals 'HI' voor homogeen inwendige uitloging en inhomogene uitwendige uitloging, of '00' voor een buisdeel zonder substantiële uitloging. Enkele algemene kenmerken die opvallen:

- De mate van interne uitloging is in de meeste gevallen groter dan de mate van externe uitloging. Dit is een indicatie dat voor dergelijke leidingen het effect van de (historische) waterkwaliteit groter is dan het effect van de bodem. Dit is in overeenstemming met de observatie van uitlogingspatronen in voorgaand onderzoek [Beuken, 2015].
- De interne uitloging is vaker homogeen verdeeld dan de externe uitloging. Dit is consistent met eerdere waarnemingen dat uitwendige uitloging door meer verschillende factoren wordt bepaald dan interne uitloging [Slaats & Mesman, 2004].
- Wel is opvallend dat inwendige uitloging ook vaak inhomogeen is. Dergelijke inhomogene aantasting suggereert een ander mechanisme dan simpelweg het oplossen van cement in agressief drinkwater (want daarvan zou een homogeen uitlogingspatroon mogen worden verwacht). Welk ander mechanisme dat moet zijn is vooralsnog niet bekend. Omdat de originele oriëntatie van de buis in de bodem niet te achterhalen is in de CT scans kunnen eventuele interacties met zwaartekracht/sediment niet worden bevestigd. Andere denkbare oorzaken zouden inhomogeniteiten in het basismateriaal zijn, of microbiologische activiteit, maar dit is op dit moment slechts speculatie.
- 5 van de 32 gescande leidingen (buizen DUN 001 t/m 005) kunnen niet correct beoordeeld worden. De reden hiervoor is een verstoord CT-beeld vanwege zand of metalen verpakkingsmateriaal rond de leidingen (bijv. gespen van spanbanden).

3.4 Statistische analyse

3.4.1 Aanpak

In de statistische analyse wordt het beeldverwerkingsalgoritme uit paragraaf 2.6 toegepast voor het bepalen van de:

- totale leidingwanddikte, D (uitgeloogd + niet-uitgeloogd);
- restwanddikte T (het niet-uitgeloogde deel van de wand);
- mate van interne (U_{int}) en externe (U_{ext}) uitloging.

De analyse wordt toegepast op een volledig buisdeel. De resolutie is instelbaar in de lengte- en omtrekriching van het buisdeel, tot een maximum resolutie van 1,5 mm in de lengterichting en 1° in de omtrekriching. Voor de karakterisering van D , T , U_{int} en U_{ext} worden bepaald:

- de gemiddelde waarden (μ);
- standaarddeviatie (σ);
- variatiecoëfficiënt ($\lambda = \sigma / |\mu|$);
- minimum- en maximumwaarden (MIN en MAX).

De statistische analyse is toegepast op 10 van de 27 buisdelen die ook visueel beoordeeld konden worden.

Tabel 2. Uitlogingskenmerken op basis van een visuele analyse van de CT-scans. De mate van inwendige en uitwendige uitloging zijn geclassificeerd als sterk (2), matig (1) of afwezig (geen waarde). Het uitlogingspatroon wordt samengevat met een tweeletterige code die voor respectievelijk inwendige en uitwendige uitloging aangeeft of deze homogeen (H), inhomogeen (I) of afwezig (O) is.

Visuele beoordeling						
Buis	Analyseerbaar	intern		extern		type patroon
		homogeen	inhomogeen	homogeen	inhomogeen	
10026-1	1		1		1	II
103679	1				1	OI
168218	1		2		1	II
176851	1					OO
177340	1		1		1	II
177598	1		2		1	II
192568	1	2			1	HI
810915	1				2	OI
BLERICK-1	1	2			1	HI
BLERICK-2	1	2			1	HI
BLERICK-3	1	2				HO
BLERICK-4	1	2				HO
D09586-1	1		2		2	II
D9691-1	1		1		1	II
D09930	1		1	2		IH
D10365-1	1		1		1	II
D10427-01	1		1		1	II
D10915-1	1			2		OH
D155353	1					OO
D156437	1		1		1	II
D161290	1		1		2	II
DUN001	0					-
DUN002	0					-
DUN003	0					-
DUN004	0					-
DUN005	0					-
IC17055-1	1				1	OI
ONB-03	1	2				HO
UN0607-1	1		1			IO
UN0607-2	1		1			IO
WM-02	1	2				IO
WML-01	1	2			2	HI

3.4.2 resultaten

De belangrijkste statistische waarden zijn weergegeven in Tabel 3. De geanalyseerde buisdelen zijn onderverdeeld in de types: II (3x), OI (1x), HI (2x), HO (2x) en IH (1x). Een aantal uitlogingskenmerken uit Tabel 3 zijn weergegeven in Figuur 7. In de samenvatting van uitloging in de totale wand valt het grote verschil tussen de gemiddelde en minimum wanddikte op. Dit sluit aan bij het sterk inhomogene karakter van de uitloging in de onderzochte buizen.

Voor inwendige uitloging (Figuur 7a) geldt dat de variatiecoëfficiënt (λ) substantieel lager ligt voor homogene uitloging ($\lambda = 0,14$ tot $0,18$) dan voor inhomogene of minimale uitloging ($\lambda = 0,55$ tot $0,86$). De gemiddelde mate van interne uitloging is

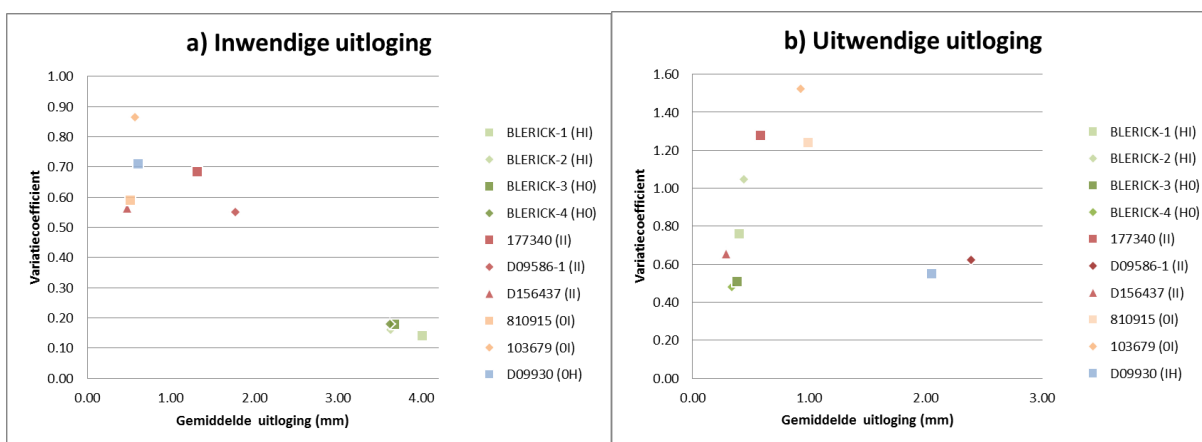
- het laagst ($\mu_{U_{int}}=0,5$ tot $1,4$ mm) voor buisdelen met minimale of matig inhomogene uitloging;
- hoger ($\mu_{U_{int}}= 1,8$ mm) voor het sterk inhomogeen uitgeloopte buisdeel;
- het hoogst ($\mu_{U_{int}}=3,6$ tot 4 mm) voor sterk homogeen uitgeloopte buisdelen.

Voor uitwendige uitloging (Figuur 7b) geldt dat λ laag is ($\lambda = 0,48$ tot $0,55$) voor de buisdelen met nauwelijks uitwendige uitloging of homogene uitwendige uitloging en dat λ hoog is ($\lambda = 0,62$ tot $1,52$) voor buisdelen met inhomogene uitwendige uitloging. De gemiddelde mate van externe uitloging is:

- laag ($\mu_{extt} = 0,29$ tot $0,93$) voor buisdelen met nauwelijks externe uitloging en matige inhomogene externe uitloging;
- hoog ($\mu_{extt} = 0,99$ tot $2,4$) voor buisdelen met een sterke homogene externe uitloging en buisdelen met een hoge mate van inhomogene externe uitloging.

Tabel 3. Uitlogingskenmerken op basis van een statistische analyse van de CT-scans.

Statistische analyse											
Buis	type patroon	interne uitloging			externe uitloging			Totale wand			
		μ (mm)	σ (mm)	λ	μ (mm)	σ (mm)	λ	μ_D (mm)	μ_T (mm)	λ_T	MIN_T (mm)
103679	OI	0.6	0.5	0.86	0.9	1.4	1.52	13.0	11.5	0.13	2.4
177340	II	1.3	0.9	0.68	0.6	0.7	1.28	14.5	12.6	0.10	6.9
810915	OI	0.5	0.3	0.59	1.0	1.2	1.24	11.4	9.9	0.13	4.5
BLERICK-1	HI	4.0	0.6	0.14	0.4	0.3	0.76	15.7	11.3	0.05	8.4
BLERICK-2	HI	3.6	0.6	0.16	0.4	0.5	1.05	15.6	11.5	0.05	8.7
BLERICK-3	H0	3.7	0.7	0.18	0.4	0.2	0.51	15.5	11.5	0.06	9.0
BLERICK-4	H0	3.6	0.7	0.18	0.3	0.2	0.48	15.6	11.6	0.06	9.3
D09586-1	II	1.8	1.0	0.55	2.4	1.5	0.62	11.6	7.4	0.16	3.6
D09930	IH	0.6	0.4	0.71	2.1	1.1	0.55	15.1	12.4	0.10	7.2
D156437	II	0.5	0.3	0.56	0.3	0.2	0.66	13.4	12.6	0.03	10.2

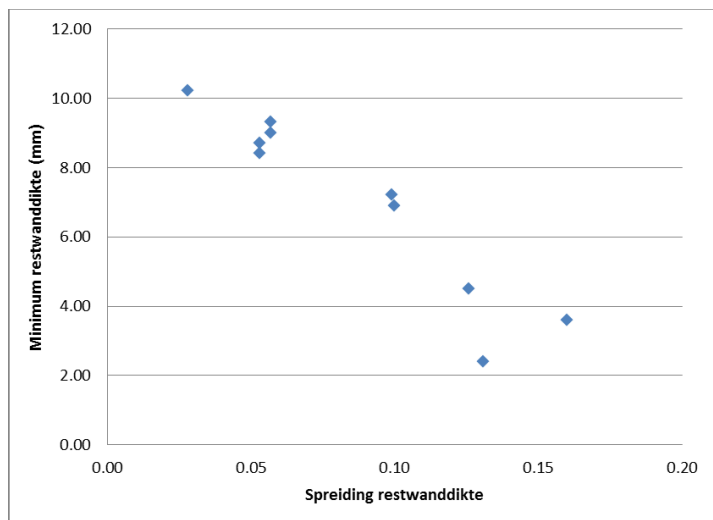


Figuur 7. De variatiecoëfficiënt afgezet tegen het gemiddelde van (a) inwendige en (b) uitwendige uitloging.

Voor de 10 geanalyseerde buisdelen is de minimum restwanddikte afgezet tegen de spreiding in de restwanddikte in Figuur 8. Voor dit (beperkte aantal) analyses is er een sterke negatieve correlatie. Dit sluit aan bij verwachting dat een grote mate van spreiding een lage minimum restwanddikte in de hand werkt. Dit resultaat moet statistisch verder onderbouwd worden om bruikbaar te zijn, maar onderschrijft het belang om een uitlogingspatroon over het gehele buisdeel te meten en niet slechts op een paar locaties.

Voor buisdelen BLERICK-3, BLERICK-4, D09586-1 staan de analyseresultaten in Bijlage I. De resultaten van leidingen BLERICK-3 en BLERICK-4 van type 'H0' (hoge mate van

homogene interne uitloging, lage mate van externe uitloging) tonen een grote gelijkenis, zowel in de visuele en de statistische analyse (Figuur 14, Figuur 15). De visuele analyse laat zien dat buisdeel D09586-1 (type 'II', Figuur 18) wordt gekenmerkt door een sterke mate van inhomogene uitloging, zowel interen als extern. De interne en in mindere mate de externe uitloging is asymmetrisch en hoekinvariant verdeeld. Dit beeld wordt bevestigd door de resultaten van de statistische analyse (Figuur 19).



Figuur 8. De minimum restwanddikte afgezet tegen de spreiding.

3.4.3 Synthese

Met het gebruikte beeldverwerkingsalgoritme is het in veel gevallen mogelijk om de inwendige en uitwendige uitloging te onderscheiden en voor beide de mate en spreiding te kwantificeren. Hierdoor ontstaat een preciezere typering van de conditie van het buisdeel dan op basis van een beperkt aantal pH-indicator tests mag worden verwacht. De typering van de conditie van het buisdeel is met enkele simpele statistische maten (gemiddelde, variantiecoëfficiënt en minimumwaarde) inzichtelijk te maken.

Omdat meetmethoden zoals indicator tests en radarmetingen in de praktijk een beperkt aantal meetpunten opleveren, is van belang of met een beperkt aantal metingen een goede inschatting is te maken van de gemiddelde of minimum restwanddikte. Gezien het grote verschil tussen gemiddelde en minimum is vooral het inschatten van het minimum daarbij belangrijk om een goed beeld te hebben van de zwakste plek in de buis. De hier uitgevoerde statistische analyse toont dat de spreiding in restwanddiktes van de 10 geanalyseerde buisdelen onderling sterk varieert (variatiecoëfficiënt tussen de 3% en 16%), en suggereert dat met toenemende spreiding de minimale restwanddikte afneemt. Als deze relatie beter geverifieerd kan worden zou deze kunnen worden benut om de verwachte minimum restwanddikte af te leiden uit de spreiding in een steekproef van meetpunten.

Voor één buisdeel (BLERICK-4) is aangetoond dat de meetnauwkeurigheid van het gemiddelde en de spreiding van de restwanddikte afneemt met de resolutie van bemonstering: met een resolutie van ca. <7 mm in de omtrek- en lengterichting worden de gemiddelde uitloging en de spreiding hierin vastgesteld met een nauwkeurigheid van <0,2%, ofwel <0.01 mm. Dit suggereert dat er ongeveer 6000 meetpunten homogeen verdeeld over de buis nodig zijn voor een natuurgetrouwe

karacterisering van de degradatie van een buisdeel. Dit onderschrijft de conclusies van Beuken (2016) rond de beperkingen van een thymolftaleïne-test maar illustreert ook de vergelijkbare beperkingen van een enkel georadarprofiel, dat typisch 200 beperkt over de buis verspreide meetpunten bevat. Een meting met rond de 6000 meetpunten verdeeld over de buis zal een aanzienlijk grotere inspanning vereisen.

4 Vergelijking met andere technieken

4.1 Inleiding

Er zijn al verschillende technieken die in het veld gebruikt worden om de degradatie van asbestcementleidingen te meten. Twee van deze technieken zijn het onderwerp van dit hoofdstuk: indicator testen (fenolftaleïne en thymolftaleïne) en radartesten (Georadar).

Ieder van deze technieken is er op gericht om de dikte van het niet-gedegreerde en het gedegreerde deel van de wand te meten. Omdat de verschillende technieken verschillende werkingsprincipes hebben, is het denkbaar dat verschillende technieken verschillende uitkomsten geven voor eenzelfde stuk AC dat gedeeltelijk is gedegreerd. Voor validatie en vertrouwen in de uitkomsten is het daarom wenselijk om de uitkomsten van verschillende technieken te vergelijken.

Omdat verschillende technieken verschillende uitvoeringsvormen hebben, meten ze doorgaans de degradatie van verschillende, beperkte gedeelten van de buiswand. Dit bemoeilijkt het één-op-één vergelijken van meetresultaten, aangezien de degradatie van asbestcementbuizen typisch inhomogeen is op een schaal van centimeters.

Röntgentomografie zou een vergelijking en validatie van technieken kunnen faciliteren. In principe geven CT-beelden een beschrijving van de degradatie over de gehele buiswand op millimeterschaal. De beelden kunnen daarmee als referentie dienen voor andere technieken. Wel geldt dat ook röntgentomografie een eigen werkingsprincipe kent dat dan op een correcte manier moet worden vergeleken met de werkingsprincipes van de andere technieken. Dit hoofdstuk verkent hoe de resultaten van indicator-metingen en radarmetingen met corresponderende CT-beelden kunnen worden vergeleken.

4.2 Vergelijking CT met indicatormetingen

4.2.1 Indicatormetingen

Wanneer AC degradeert via uitloging, verdwijnen er componenten uit het cement die normaal zorgen voor een sterk basisch milieu in de buiswand. De pH in het poriewater daalt hierdoor. Het ontbreken van het uitgeloopte materiaal kan daardoor zichtbaar gemaakt worden door een pH-indicator aan te brengen op een vers AC breukvlak. Internationaal wordt de indicator fenolftaleïne het meest gebruikt; in Nederland wordt sinds 2013 bij voorkeur de indicator thymolftaleïne gebruikt uit gezondheidsoverwegingen [Leroy et al., 1996; Beuken, 2015].

4.2.2 Theoretische vergelijking

Het verdwijnen van componenten uit het cement door uitloging in water gaat volgens een bepaalde volgorde. De volgorde komt overeen met de steeds lagere pH waarbij opeenvolgende componenten stabiel zijn. De lokale pH in het materiaal is ~12,5 terwijl de eerste component, calciumhydroxide, oplost en pas wanneer deze component lokaal volledig is verdwenen zal de pH verder dalen. Bij pH 10,6 zal de volgende component in

oplossing gaan. Het gevolg is dat het gedegradeerde deel van het cement bestaat uit een serie van mineralogische zones, gescheiden door redelijk abrupte fronten [Adenot en Buil, 2002, Carde et al., 1996, Alexander et al., 2013].

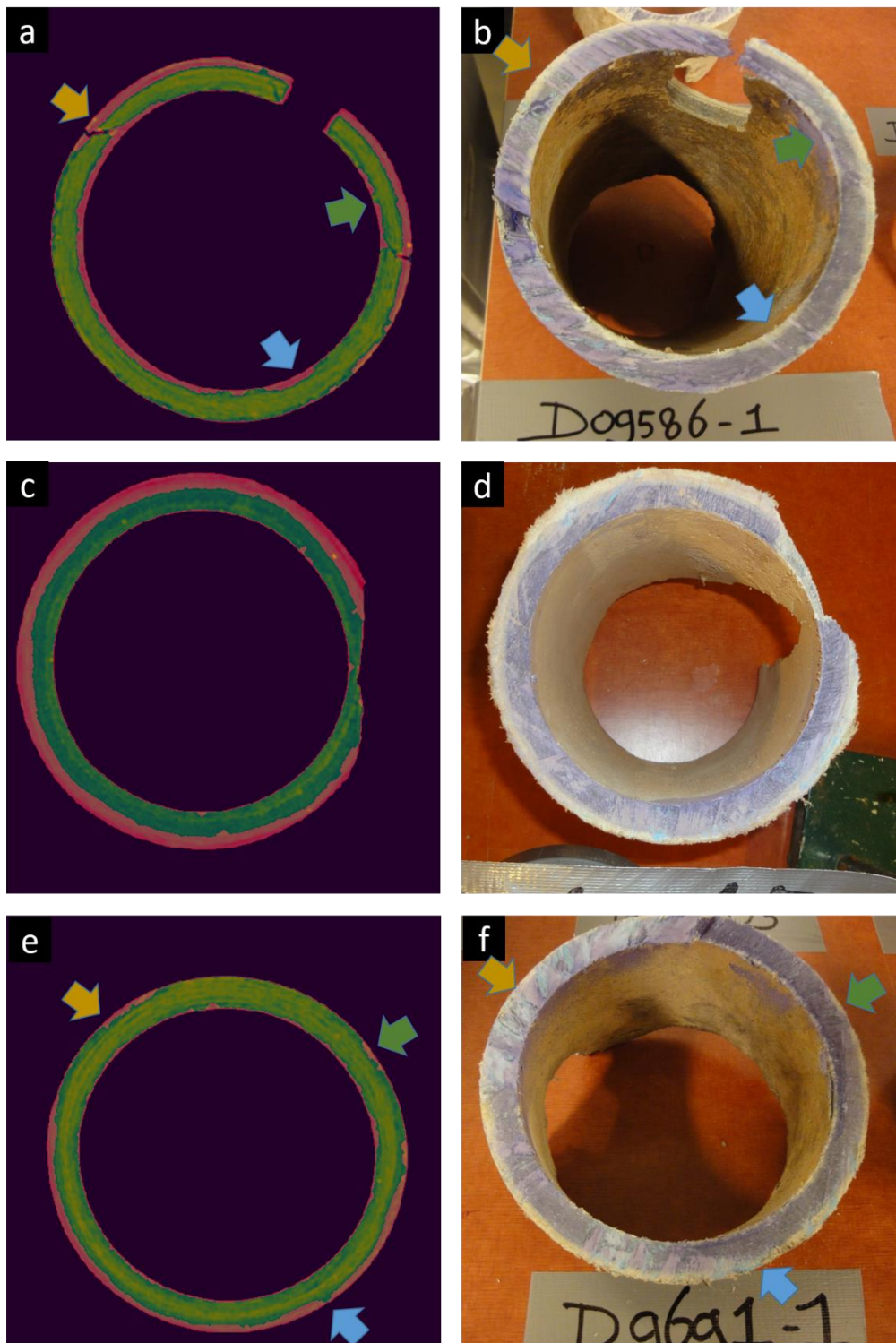
De pH in het gedegradeerde materiaal loopt hierdoor van 10,6 op de grens tussen gedegrademd en ongedegrademd materiaal naar de pH van het uitlogende medium in contact met de buiswand. Fenolftaleïne is kleurloos bij $pH < 8,2$, en verkleurt naar roze wanneer de pH hoger wordt. Thymolftaleïne verkleurt van kleurloos bij $pH < 9,4$ naar blauw [Binas, 1992]. Deze indicatoren kunnen daardoor niet de precieze locatie van de grens tussen gedegrademd en ongedegrademd materiaal geven. Le Bellego en anderen [2000] hebben met experimenten laten zien dat de werkelijke dikte van het gedegrademde deel ongeveer 16% groter is dan dat wat wordt aangegeven met fenolftaleïne. Omdat het omslagpunt van thymolftaleïne bij een hogere pH ligt dan dat van fenolftaleïne, zal de discrepantie voor die indicator kleiner zijn. Het is daarbij belangrijk om op te merken dat ook uit deze laatste 16% alle calciumhydroxide is verdwenen, wat betekent dat dit materiaal het grootste deel van haar sterkte is verloren: Carde et al. [1996] hebben voor cement laten zien dat de uitloging van het calciumhydroxide meer dan tien keer zoveel effect heeft als de uitloging van de andere componenten samen.

De uitloging van het calciumhydroxide is ook verantwoordelijk voor de grootste toename in porositeit van uitgelooft cement [Carde et al., 1999]. Het is daarom te verwachten dat de overgang tussen gedegrademd en ongedegrademd materiaal zich in de CT-beelden zal manifesteren als de scherpste overgang in grijswaarden (zie ook 2.5 en 2.7) en dat dit front in de CT-beelden samenvalt met de belangrijkste overgang in sterkte. Daarmee moet dus ook verwacht worden dat er een inherente, systematische discrepantie zal zijn tussen de dikte van de gedegrademde laag zoals als bepaald met een indicatortest en de dikte zoals zichtbaar in een CT-beeld. Omdat de verwachte afwijking systematisch is, moeten de vormen van de gemeten profielen echter goed overeenkomen.

4.2.3 Vergelijking van data

Enkele buizen waarvan de CT-scans zijn gebruikt in dit project zijn na de scan doorgezaagd in verband met experimenten die zijn beschreven in [Beuken en van Laarhoven, 2019]. Op de zaagvlakken is vervolgens een fenolftaleïnetest uitgevoerd. Zagen was noodzakelijk binnen dat onderzoek, maar is voor indicatortesten niet optimaal, omdat hierdoor gruis van gedegrademd en ongedegrademd materiaal over het zaagvlak verspreid kunnen worden. In een paar gevallen kan de locatie van het zaagvlak in de lengterichting van de buis (binnen enkele centimeters) teruggevonden worden in de CT-beelden dankzij opvallende beschadigingen aan de buis. Dit biedt een gelegenheid om CT en indicatortest te vergelijken.

In Figuur 9 zijn de dwarsdoorsneden uit de CT-data die op basis van kenmerkende beschadigingen in de buis lijken overeen te komen met de posities waar later gezaagd werd weergegeven. Daarnaast zijn de corresponderende fenolftaleïnetesten weergegeven. Over het algemeen is een goede kwalitatieve overeenkomst zichtbaar tussen fenolftaleïne- en CT-profielen. Deze vergelijking wekt de indruk dat de materiaalovergangen die zichtbaar zijn in de CT-beelden goed overeenkomen met de degradatie die zichtbaar wordt gemaakt met pH-indicatoren. De beperkte aard van de vergelijking moeten echter worden benadrukt. Een correcte, kwantitatieve vergelijking vereist een systematisch experiment met een groter aantal goed gecoördineerde metingen met beide technieken.



Figuur 9. Vergelijking van degradatie op een buisdoorsnede zoals zichtbaar gemaakt met CT (a,c,e) en fenolftaleïne (b,d,f) voor de buizen met ID D09586-1 (a,b), ID D10915-1 (c,d) en ID D9691-1(e,f). In de CT beelden zijn de gedegradeerde delen van het AC rood gemaakt met behulp van het beeldverwerkings algoritme dat is beschreven in paragraaf 2.7. De gekleurde pijlen illustreren enkele overeenkomsten in de vorm van de degradatieprofielen.

4.3 Vergelijking CT met radarmetingen

4.3.1 Radarmetingen

Surface penetrating radar (georadar) is oorspronkelijk ontwikkeld voor bodemkartering. Rond 2000 is aangetoond dat deze techniek ook inzetbaar is voor toestandsbepalingen van AC leidingen [Mesman, 2001, Slaats & Mesman, 2004]. Radarmetingen zijn interessant voor drinkwaterbedrijven omdat deze non-destructief zijn: om te meten is het niet nodig materiaal van de leiding weg te nemen of de waterlevering te onderbreken; wel is het nodig de leiding bloot te leggen.

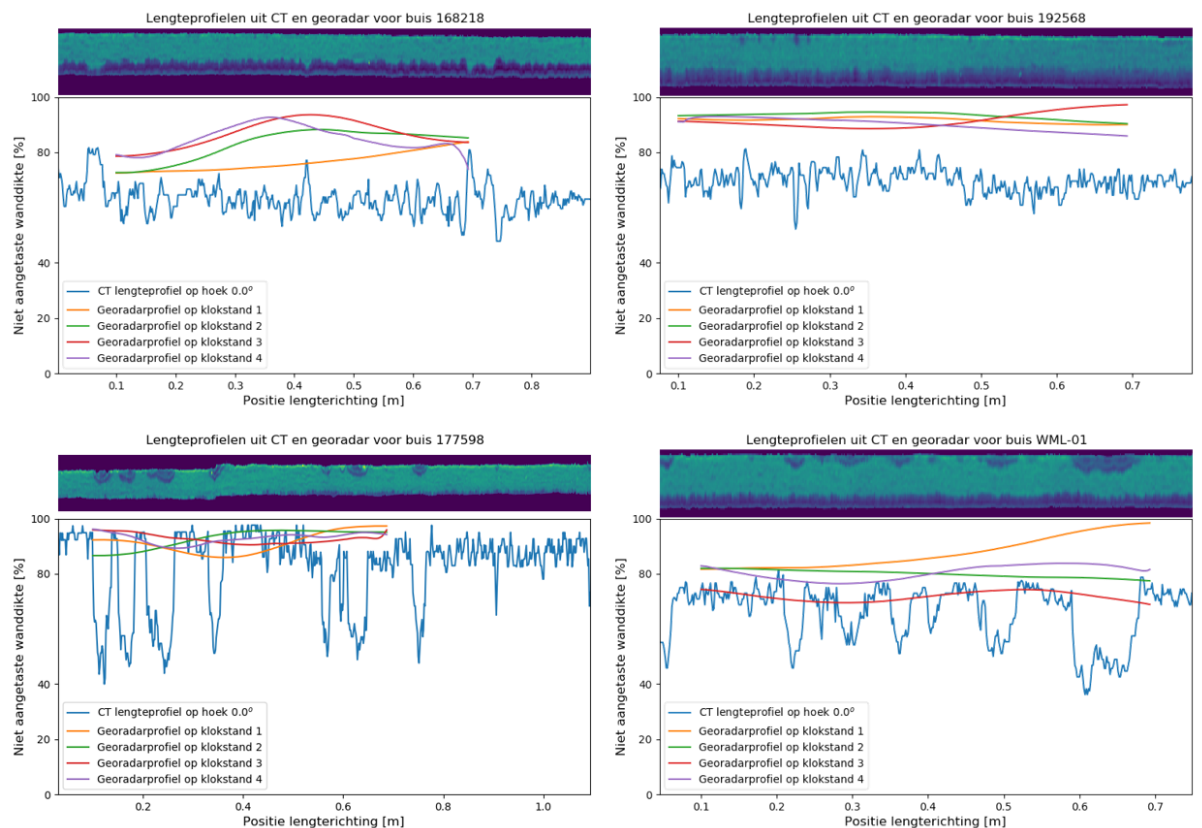
Het meetprincipe van georadar berust op reflectie van elektromagnetische microgolven door materiaalovergangen in de wand van de leiding [Smolders et al., 2009]. Aankomsttijd en signaalsterkte van de reflectiesignalen zijn gevoelig voor verschillen in laagdikte en in de karakteristieke elektrische eigenschappen van de lagen waaruit de AC-leiding is opgebouwd. De laagdikte en elektrische eigenschappen zijn op deze manier af te leiden uit de radarsignalen.

Uit de eerste incidentele vergelijkingen tussen conditiebepalingen met radar en fenolftaleïne kwam naar voren dat deze technieken eenzelfde conditieklassering toewijzen aan eenzelfde buis [Anzola et al., 2000, Mesman, 2001, Slaats et al., 2004]. Uit een systematische vergelijking van metingen met radar en fenolftaleïne kwam echter naar voren dat de uitkomsten van de technieken statistisch slecht overeenkomen: metingen met radar gaven systematisch een kleinere spreiding in uitloging dan metingen met fenolftaleïne, en slechts in een kwart van de gevallen waren uitslagen van radar en fenolftaleïne statistisch equivalent [Mesman en van der Wielen, 2005]. Daarbij werd de kanttekening gemaakt dat de technieken lastig te vergelijken zijn vanwege de verschillende werkingsprincipes. Bovengenoemde studies en ook een recentere haalbaarheidsstudie uit Australië [Berndt en Davis, 2009] wijzen op het belang van verdere validatie van deze veelbelovende techniek.

4.3.2 Vergelijking van data

In het kader van het originele sterkteonderzoek aan de gescande buizen zijn op een aantal van deze buizen ook georadarmetingen uitgevoerd [Beuken en van Laarhoven, 2019]. Per buis zijn lengteprofielen - met een resolutie van 3 mm tussen meetpunten - gemeten op klokstanden 3, 6, 9 en 12 uur. De oriëntatie en positie van de lengteprofielen ten opzichte van de oriëntatie van de buis in de CT-scans is niet beschikbaar, omdat de CT-scans pas in een later stadium werden gepland. Dit bemoeilijkt een één-op-éénvergelijking van de lengteprofielen uit georadar met de lengteprofielen uit CT. Desalniettemin biedt deze dataset een kans om CT en radar te vergelijken.

Voor een eerste indruk van de signalen uit beide metingen zijn in Figuur 10 voor vier buizen de vier radarlengteprofielen en één CT-lengteprofiel weergegeven. Hierin valt vooral op dat de radarprofielen veel vloeiender van aard zijn en veel minder variatie vertonen dan de CT-profielen. De scherpe pieken in de CT-profielen die overeenkomen met de vlekken van inhomogene aantasting op de buitenwand ontbreken in de radarprofielen volledig. Daarnaast liggen de radarprofielen over het algemeen hoger, óók voor buizen 168218 en 192568, die hoofdzakelijk inwendig homogeen uitgeloozd zijn.



Figuur 10. Vergelijking van lengteprofielen gemeten met radar met een lengteprofiel gemeten met CT voor buizen 168218, 192568, 177598 en WML-01. Ter illustratie van het CT-profiel is voor iedere buis de bijbehorende CT-lengtedoorsnede van de wand weergegeven boven de figuur (vergelijkbaar met de omtrekdoorsnede van de wand in Figuur 1) Voor de zichtbaarheid is de afbeelding van de lengtedoorsnede 5x uitgerekt in de hoogte; de horizontale as komt overeen met de positie in de buis.

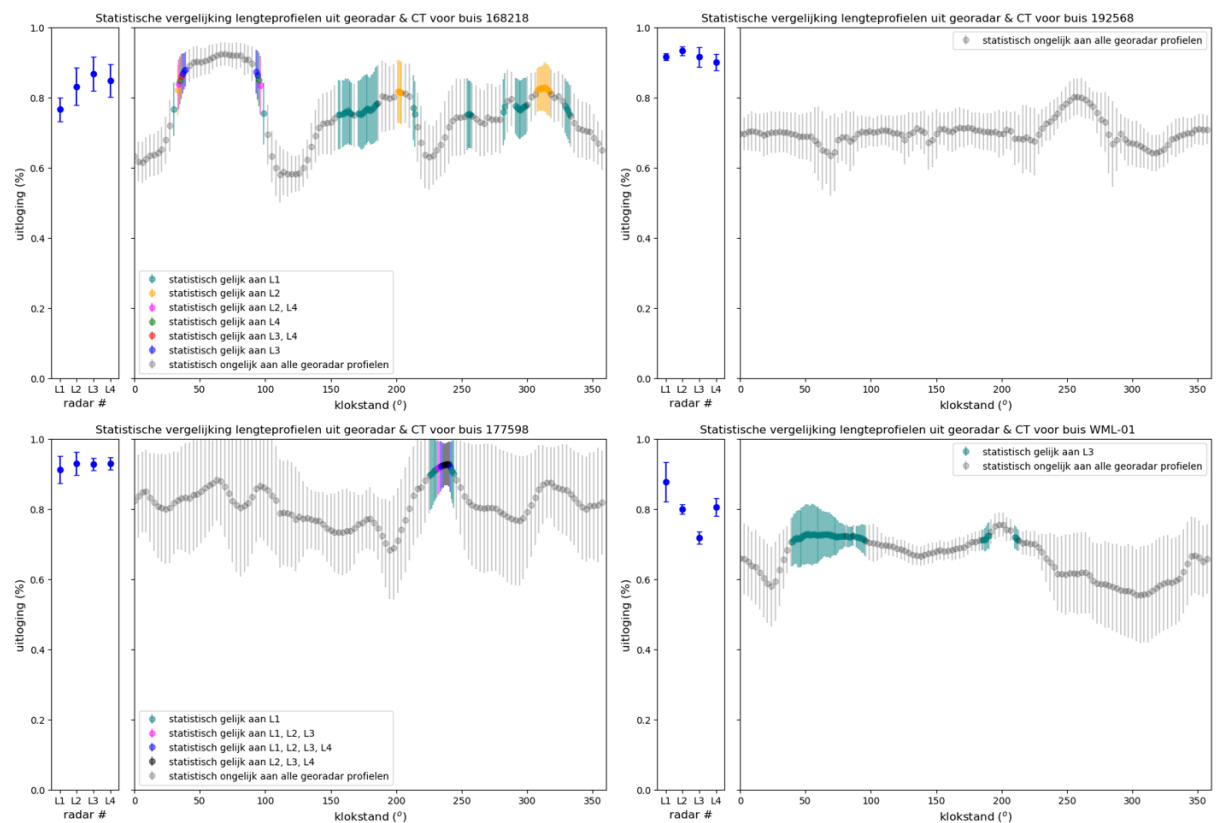
Op basis van de informatie in Figuur 10 kan nog niet geconcludeerd worden dat de radar- en CT metingen slecht overeenkomen: de willekeurig gekozen CT-profielen komen niet noodzakelijkerwijs overeen met één van de klokstanden waarop de radarmetingen werden uitgevoerd en kunnen dus vanwege toeval afwijken. De radarprofielen werden daarom in Figuur 11 als volgt vergeleken met de complete CT dataset:

- Met het algoritme uit hoofdstuk 2 werden, voor iedere graad op de omtrek, 360 lengteprofielen bepaald.
- Voor ieder lengteprofiel (CT en radar) werd de gemiddelde restwanddikte en de bijbehorende standaarddeviatie bepaald.
- Met een statistische test, Welch's unpaired t-test, werd bepaald welke lengteprofielen uit radar en CT statistisch verschillen met een (grote) zekerheid van $p=0.001$.

Per buis in Figuur 11 kan het volgende worden geconcludeerd:

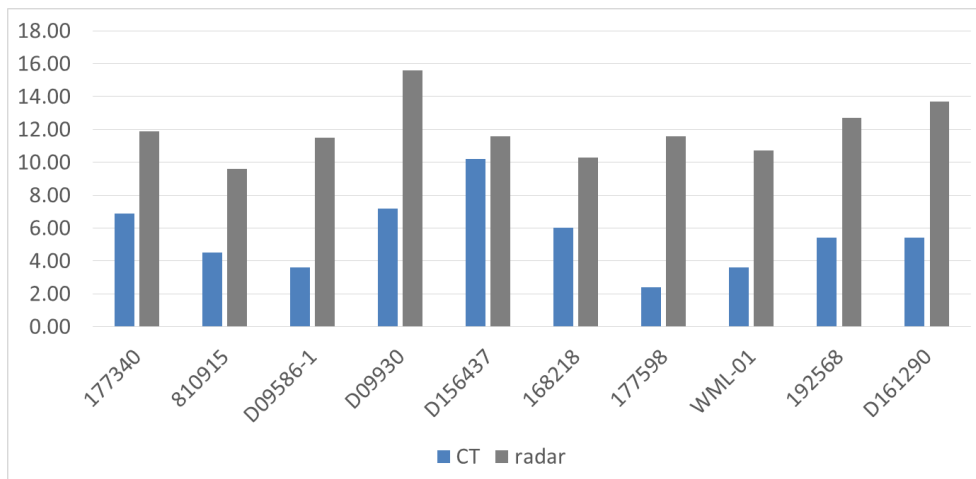
- voor buis 192568 komen de radarprofielen in geen geval overeen met een CT-profiel;

- voor buis 177598 komen een aantal CT-profielen rond de 230° overeen met alle radar profielen. Omdat het bekend is dat de radarprofielen met ~90° verschil over de buis verdeeld zijn kan echter geconcludeerd worden dat deze plaatselijke overeenkomst op toeval berust en dat de radarprofielen niet met CT-data overeenkomen;
- voor buis WML-01 kan hetzelfde geconcludeerd worden als voor buis 177598, temeer daar alleen radarprofiel L3 met enkele CT-profielen overeenkomt;
- voor buis 168218 kan hetzelfde geconcludeerd worden als voor buis 177598.

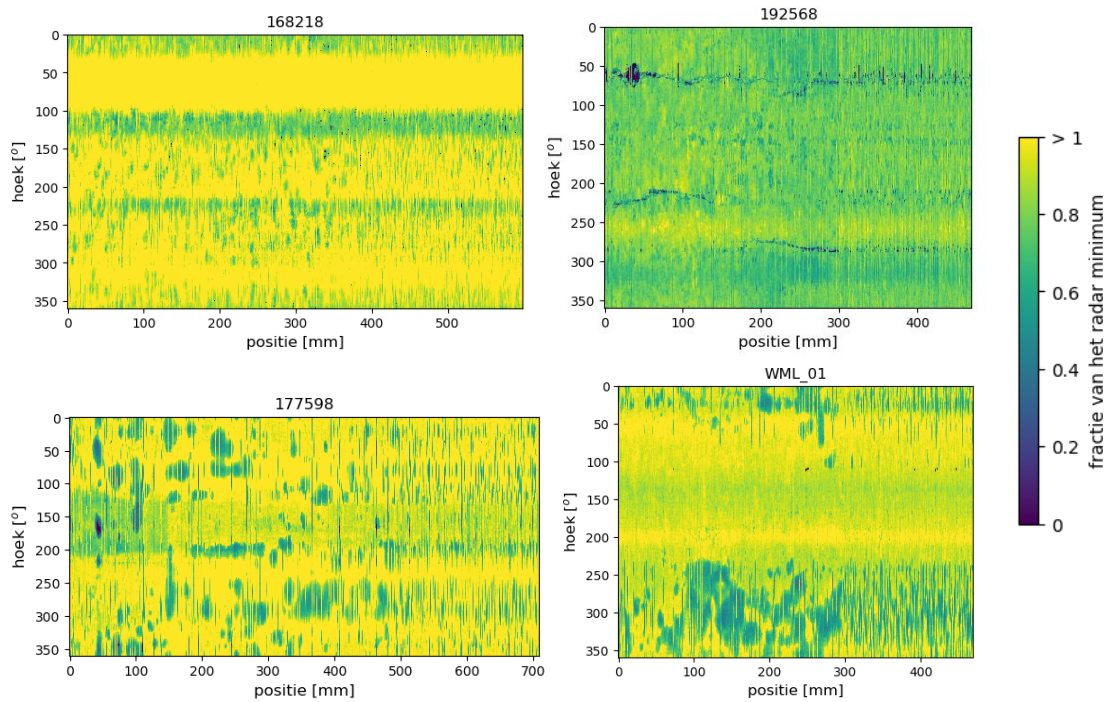


Figuur 11. Statistische vergelijking van de radar lengteprofielen (L1-L4) met 360 CT lengteprofielen verdeeld over de omtrek van de buis, voor buizen 168218, 192568, 177598 en WML-01.

Samenvattend suggereren deze resultaten dat de radarmetingen op twee manieren afwijken van de CT metingen: de radarmetingen lijken minder gevoelig voor plekken met lokale aantasting en de lijken de mate van uitloging systematisch te onderschatten. Dit kan leiden tot een overschatting van de restwanddikte. Figuur 12 illustreert het verschil in de gevonden minimum restwanddikte met de verschillende technieken voor een aantal van de buizen die in dit hoofdstuk en hoofdstuk 3 zijn geanalyseerd. De onderschatting van radar ten opzicht van CT betreft in de meeste gevallen meer dan 5 mm; een substantieel aandeel van de ~15 mm dikke wand. Figuur 13 laat voor alle posities in de CT scan zien hoeveel lager de wanddikte op die positie is dan het minimum dat is gevonden met georadar. Dit illustreert dat het hierbij niet gaat om een lokale onderschatting, maar dat afstand tussen het georadarminimum en de lokale restwanddikte op veel plaatsen in de buis groot is.



Figuur 12. Minimum in restwanddikte dat is gevonden met respectievelijk CT en radar voor een aantal buizen.



Figuur 13. De lokale relatieve restwanddikte t.o.v het georadarminimum als functie van positie in omtreksrichting en lengterichting van de buis. De data is bepaald uit de CT beelden en genormaliseerd op de minimum restwanddikte gevonden met georadar. Hoe donkerder de waarde, hoe meer de lokale restwanddikte onder het georadar minimum ligt.

5 Conclusies, aanbevelingen en openstaande vragen

5.1 Conclusies

De CT-beelden geven een ongekend compleet en gedetailleerd beeld van de uitloging van een asbestcement buisdeel. Op basis van de theorie achter CT en uitloging (paragrafen 2.2, 2.5 en 4.2.2) mag verwacht worden dat een CT-doorsnede goed overeenkomt met een thymoltaleïneprofiel. De - zeer beperkte - vergelijking met fenoltaleïneprofielen (paragraaf 4.2.3) lijkt dit te onderschrijven. Vanwege de grote hoeveelheid profielen binnen één CT-scan is het echter niet praktisch om - zoals met thymoltaleïneprofielen gebeurt - beeld met de hand te vertalen naar getallen. Het basale beeldverwerkingsalgoritme dat voor deze studie is opgesteld (paragraaf 2.7) demonstreert dat een geautomatiseerde aanpak goed haalbaar is. Paragrafen 3.3 en 3.4 laten zien dat een eenvoudige statistische duiding van de resultaten van de beeldverwerking overeenkomt met een visuele duiding van de CT beelden. Dit biedt perspectief voor verder geautomatiseerde verwerking van de CT resultaten.

De CT-scans laten zien dat buizen over het algemeen een grillig uitlogingspatroon hebben. Daarbij is opvallend dat ook inwendige aantasting veelvuldig inhomogeen is. De statistische analyse in paragraaf 3.2 en Figuur 7 suggereert dat het gemiddelde en de spreiding in uitloging gerelateerd kunnen worden aan de minimum restwanddikte wanneer deze bepaald worden uit een steekproef van ongeveer 6000 lokale metingen. Deze conclusie is begrenst door de beperkte hoeveelheid data die hieraan ten grondslag ligt. Als deze relatie beter geverifieerd kan worden zou onderzocht kunnen worden of deze relatie kan worden benut om de verwachte minimum restwanddikte af te leiden uit een minder nauwkeurig bepaalde spreiding op basis van de kleinere steekproef van meetpunten die praktisch zou kunnen volgen uit een exitbeoordeling.

De vergelijking van CT-profielen met georadarprofielen (paragraaf 4.3) suggereert dat de gebruikte georadartechniek de uitloging van buisdelen sterk onderschat. De relatief lage spreiding in radarprofielen (Figuur 11) suggereert dat met name vlekken van inhomogene uitloging gemist worden, wat een substantiële overschatting van de minimum restwanddikte in de hand zal werken, gezien het sterk inhomogene karakter van de uitloging in de meeste buisdelen (Tabel 2). Ook homogene uitloging wordt echter systematisch onderschat (Figuur 10 en Figuur 11, buizen 192568 en WML-01). Onderschatting van de mate van degradatie leidt één op één tot een onderschatting van de daadwerkelijke spanning die optreden in het buismateriaal en dus een overschatting van de conditie.

5.2 Aanbevelingen met het oog op toepassing

Voor incidenteel gebruik lijken CT-metingen aan buisdelen relatief goedkoop: metingen kosten een paar honderd euro per buis; transport en asbestveiligheid blijven te overzien omdat de buizen ingepakt kunnen blijven (paragraaf 2.3); en het automatiseren van de vertaling van beeld naar getal is goed haalbaar. Het is daarom aan te bevelen om het gebruik van CT-metingen te overwegen wanneer de hoge kosten of risico's rond een beslissing - of de evaluatie van een beslissing - een nauwkeurige inschatting van de leidingconditie vragen.

Voor verdere onderbouwing van het vertrouwen in de capaciteit van CT om degradatie in kaart te brengen wordt een meer gestructureerde vergelijking met thymolftaleïne-profielen aanbevolen. Een dergelijke vergelijking zou ook als basis moeten dienen voor het ijken en valideren van een geavanceerder beeldverwerkingsalgoritme.

Ook is het aan te bevelen om CT-metingen te benutten bij het valideren van de prestaties van andere meettechnieken. Het is belangrijk om daarbij aandacht te besteden aan de vertaling tussen de resultaten onderling, maar ook aan de vertaling van de resultaten naar de sterkte van het materiaal. Met name voor uitloging mag op basis van de principes achter CT en uitloging verwacht worden dat de scherpste materiaal overgang goed overeenkomt met de belangrijkste sterkte overgang, waardoor de CT beelden goed als referentie kunnen dienen. Ook scheurtjes met dikten van 0.3 mm of meer zullen perfect te volgen zijn met CT. Bij sommige vormen van chemische aantasting zullen CT beelden mogelijk minder eenduidig zijn vanwege afzettingen van neerslagproducten. Voor de andere meettechnieken gelden waarschijnlijk vergelijkbare overwegingen.

De vergelijking van de CT beelden met verschillende technieken in deze studie wordt beperkt door het feit dat deze is gebaseerd op metingen die niet onderling op elkaar zijn afgestemd. Voor toekomstige inspanningen rond validatie en onderzoek wordt daarom aanbevolen om alle metingen eenduidig te relateren aan de geometrie en oriëntatie van het buisdeel. Overige aanbevelingen voor toekomstige metingen met CT zijn om, ten eerste, de metingen ook te relateren aan de oriëntatie van het buisdeel in het veld, zodat patronen in degradatieprofielen (zie Figuur 13) beter kunnen worden gerelateerd aan mogelijk invloedsfactoren en om, ten tweede, buizen schoon te maken vóór de meting voor een betere verwerking van de beelden.

Het wordt aanbevolen om in exit beoordelingen georadar niet als substituuut voor thymolftaleïne-testen te gebruiken zolang de discrepantie tussen CT en radar onverklaard is. Eén thymolftaleïneprofiel levert informatie over een vergelijkbaar aandeel van de buiswand als één radarprofiel, maar is minder gevoelig voor onderschatting van de lokale degradatie.

Thymolftaleïneprofielen aanvullen met betrouwbare radarprofielen zou wel praktische voordelen hebben. Radarprofielen geven de extra mogelijkheid om over de lengte in plaats van de omtrek te meten. Figuur 13 suggereert echter dat één omtrekprofiel meer informatie zal geven over de algemene toestand van een buisdeel dan één lengteprofiel, omdat er duidelijk hoeken zijn met een hogere of lagere typische uitloging over de volle lengte.

Niet-destructieve technieken zoals radarmetingen geven ook de waardevolle mogelijkheid om gemakkelijk méér profielen te verzamelen dan met thymolftaleïne redelijkerwijs haalbaar is. De analyse in paragraaf 3.2 (en voorgaande onderzoeken) suggereren dat er tientallen lengte/omtrekprofielen nodig zouden zijn om een buis goed te karakteriseren. De methoden uit paragraaf 3.2 en Figuur 7 kunnen op meerdere CT-scans worden toegepast om te bepalen hoeveel profielen precies nodig zijn wanneer de meetpunten niet gelijkmatig over de buis zijn verspreid maar in plaats daarvan in lijnen over de buis worden getrokken. Het wordt aanbevolen om meetschema's met niet-destructieve technieken op die manier te onderbouwen.

5.3 Aanbevelingen met het oog op onderzoek

In het AC sterkteonderzoek (Beuken en Van Laarhoven, 2019) werden verrassend lage bezwijkspanningen gemeten voor de AC buisdelen waarvan de CT-scans het onderwerp zijn van dit rapport. Dergelijke materiaalwaarden vormen belangrijke invoer voor het voorspellen van leidingtoestand en -conditie. Deze waarden voor bezwijkspanning werden echter gebaseerd op onder andere minimum restwanddiktes bepaald met radarmetingen. Nu duidelijk is dat deze waarden niet betrouwbaar zijn wordt aangeraden om met behulp van de CT-scans de werkelijke minimumwanddikte op het breukvlak te bepalen voor een herinterpretatie van de resultaten van de sterkteproeven (er zijn CT-scans gemaakt van de buizen vóór en ná bezwijken tijdens de sterkteproeven).

Een gedetailleerde studie naar mogelijke oorzaken voor de discrepanties tussen georadar en CT metingen viel buiten de strekking van deze studie. Voor verdere onderbouwing van het vertrouwen in de capaciteit van de georadartechniek om degradatie te karakteriseren wordt dergelijk onderzoek aanbevolen. Eén mogelijke oorzaak is dat de inhomogene uitloging zorgt voor een dusdanig onregelmatige geometrie van de materiaalovergangen dat de radargolven op onverwachte wijze reflecteren, waardoor de meting wordt verstoord.

De CT-beelden laten duidelijk zien dat de aantasting van een buisdeel geregeld erg grillig is met veel lokale variaties; niet alleen vanwege inhomogene uitloging op de buitenwand, maar ook op de binnenwand. De huidige toestandsmodellen gaan uit van homogene uitloging. De omvang van de rol van een lokale 'zwakke schakel' bij falen blijft onduidelijk. Eén manier om hier meer inzicht in te krijgen is om een eindige elementen (FEM) model op te stellen waarmee de spanningen in de buiswand kunnen worden onderzocht voor verschillende uitlogingspatronen. Het beantwoorden van deze vraag is belangrijk voor een zo goed mogelijke vertaling van restwanddiktemetingen – gemeten met om het even welke techniek – naar conditie.

CT-scans zouden ook waardevol kunnen zijn voor onderzoek aan andere leidingmaterialen. Eén voorbeeld zou zijn om te proberen ingesloten deeltjes van afwijkend materiaal in bepaalde groepen PVC-U buizen te karakteriseren. Informatie over de verdeling van deeltjesgrootte en typische deeltjes concentraties in relevante uitgenomen buizen zou waardevolle informatie zijn voor het voorspellen van de conditie van PVC-U.

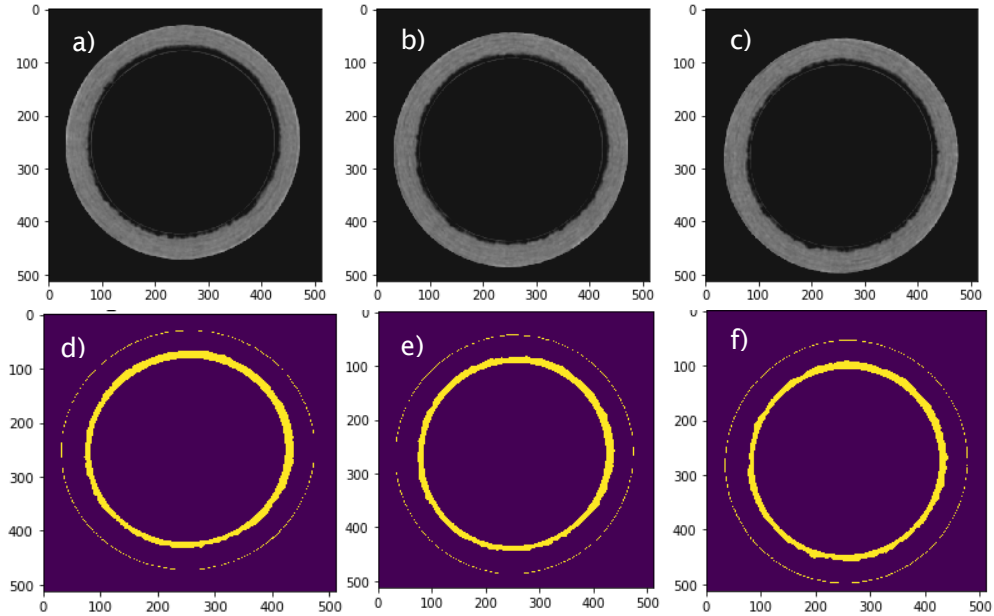
6 Literatuur

- Aruntas, H.Y., Tekin, I., and Birgul, R. (2010) Determining Hounsfield unit values of mortar constituents by computerized tomography.
- Beuken, R.H.S. (2015). Exitbeoordelingen AC-leidingen bij WML –Toepassing, analyse en toekomstige inzet. BTO 2018.037.
- Beuken, R.H.S. (2016) Exitbeoordelingen AC leidingen bij WML –Fase 2: Nadere analyse. BTO 2016.094.
- Beuken, R.H.S., and van Laarhoven, K.A. (2019) Sterkteonderzoek asbestcementbuizen. KWR, Nieuwegein, Nederland. BTO 2019.008.
- Berndt, M.L., and Davis, P. (2009) Non destructive testing for condition assessment of Asbestos Cement Pipes. Ozwater Convention and Exhibition, 2009, Melbourne, Australian Water Association 2009.
- Binas (1992) Binas informatieboek vwo/havo voor het onderwijs in de natuurwetenschappen. 3e druk, Wolters-Noordhoff, Groningen.
- Carde C., Francois R., Torrenti J.M. (1996) Leaching of both calciumhydroxide and C-S-H from cement paste: modeling the mechanical behavior. Cement and Concrete Research 26:1257-1268.
- Carde C., Francois R. (1999) Modelling the loss of strength and porosity increase due to the leaching of cement pastes. Cement & Concrete Composites 21:181-188.
- GE Healthcare (2019) Brivo XR115 Brochure. Accessed online on jan 2019 at shs.gehealthcare.com/downloads/Brivo_XR115_Brochure.pdf.
- Le Bellego, C., Gerard, B., and Pijaudier-Cabot, G. (2000) Chemo-mechanical effects in mortar beams subjected to water hydrolysis. Journal of Engineering Mechanics.266-277.
- Leroy, P., Schock, M.R., Wagner, I., Holtschulte, H. (1996). Cement-based materials in: AwwaRF/DVWG-Technologiezentrum Wasser. International corrosion of water distribution systems (second edition), AWWA Denver.
- Mesman, G.A.M. (2001). Validatie Georadar voor kleine diameters AC buizen. BTO 2001.150 (C).
- Mesman, G.A.M., and van der Wielen, J. (2005) Georadar: geschikt om conditie AC-leidingen te beoordelen? KWR, Nieuwegein, Nederland. KWR05.023.
- Mesman, G.A.M., R.H.S. Beuken en M.A. Meerkerk (2016) Conditiebepaling voor drinkwaterleidingen, KWR, PCD 6:2016.
- Slaats, P.G.G., G.A.M. Mesman (2004) Conditiebepaling asbestcement waterleidingen, Kiwa, Nieuwegein, BTO 2003.039.
- Slaats, P.G.G., Mesman, G.A.M., Rosenthal, L.P.M., and Brink, H. (2004) Tools to monitor corrosion of cement-containing water mains. Water Science & Technology 49:33-39.
- Smolders, S., Verhoest, L., De Gueldre, G., and Van De Steene, B. (2009) Inspection of deteriorating asbestos cement force mains with georadar technique. Water Science & Technology.
- Sterk, G.R., Van de Lisdonk, C.A.C. (1999). Conditiebepalingsmethoden voor asbestcementleidingen –Beoordeling met praktijkonderzoek. SWE 99.004.
- TU Delft (2018) Persoonlijke communicatie met uitvoerend technicus.
- VEWIN et al. (2010) Veilig werken met asbestcementleidingen in het ondergrondse openbare waterleiding-, gas- en rioolafvalwaternet. Leiderdorp.

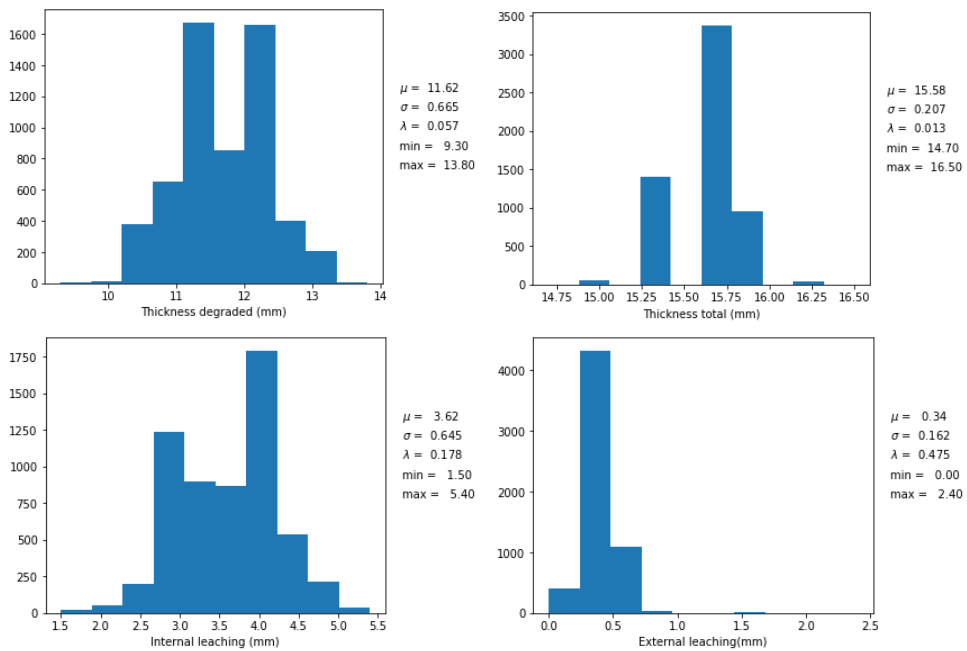
- Wan, K., Li, Y., Sun, W. (2012). Application of tomography for solid calcium distributions in calcium leaching cement paste. *Construction and Building Materials*, 36, p.913-917.
- Wan, K., Chen, L.Y. and Xu, Q. (2015) CALibration of grayscale values of cement constituents using industrial X-ray tomography. *Science China* 58:485-492.
- Water New Zealand (2017) NAtional asbestos cement pressure pipe manual volume two: technical/supporting data. Water New Zealand, Wellington, New Zealand.

Bijlage I

BLERICK-4 (Uitlogingstype H0)

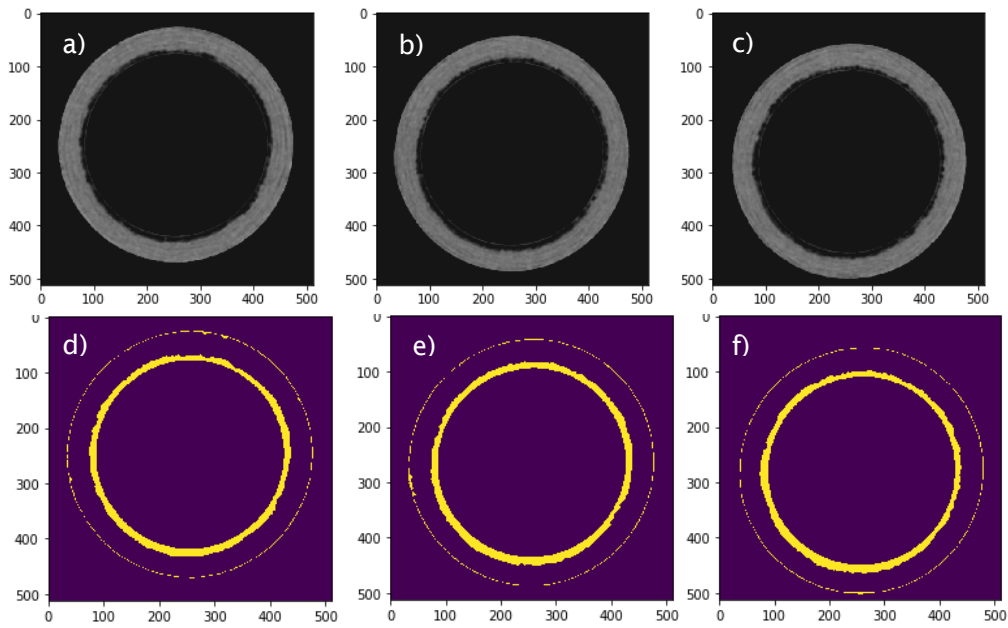


Figuur 14. Uitlogingsprofielen in omtrek-richting voor leiding 'BLERICK-4 voor doorsnede 100 (frame a en d), 230 (frame b en e) en 360 (frame c en f). Bovenste rij: grijswaarden, onderste rij: resultaat van beeldanalyse beschreven in hoofdstuk 2.

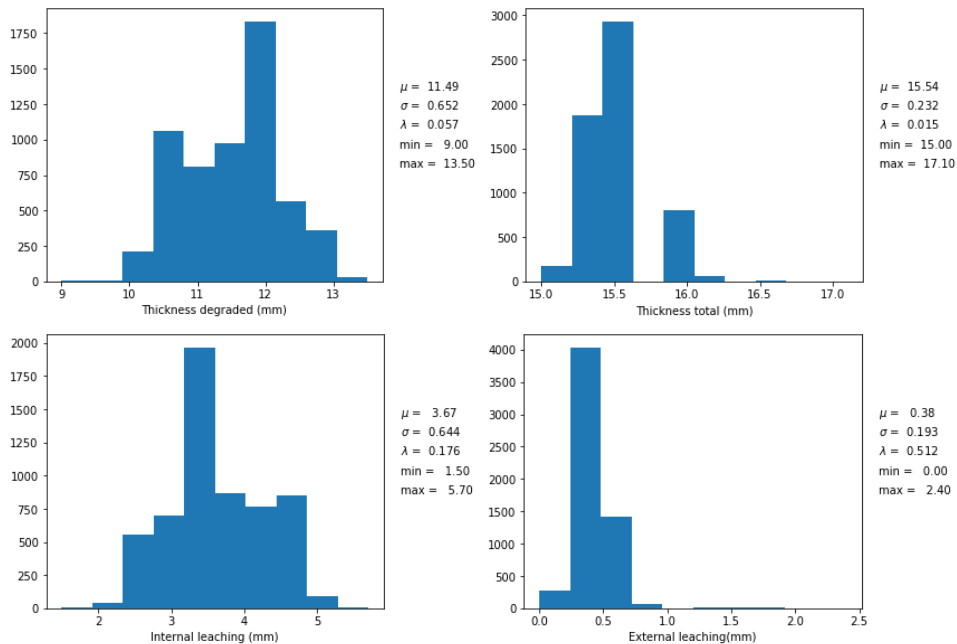


Figuur 15. Histogrammen voor restwanddikte (T), totale wanddikte (D), mate van interne (U_{in}) en externe (U_{ext}) uitloging voor leiding BLERICK-4.

BLERICK-03 (Uitlogingstype H0)

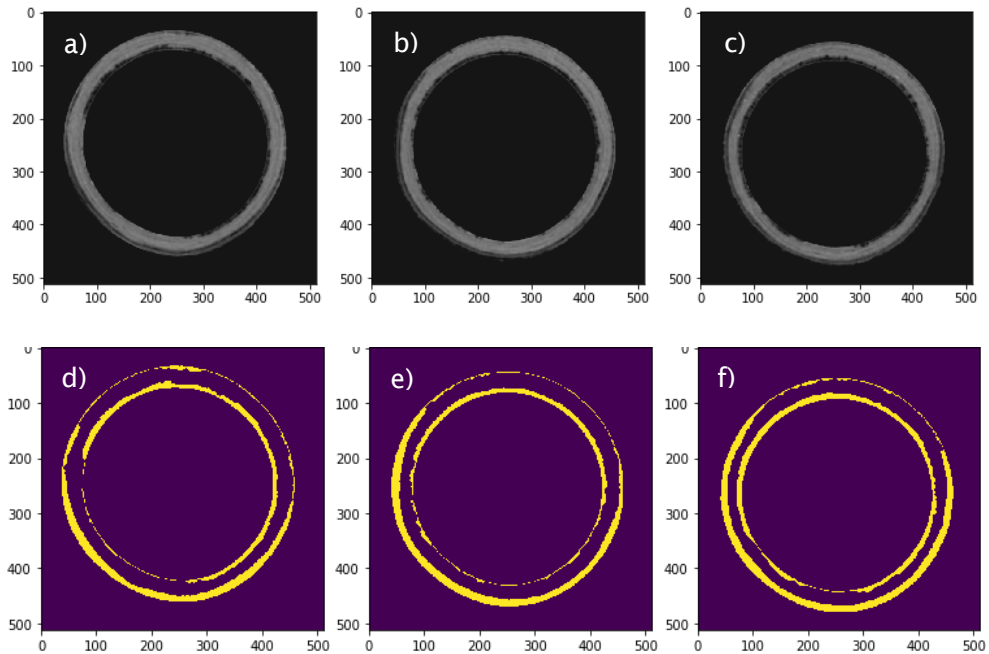


Figuur 16. Uitlogingsprofielen in omtrek-richting voor leiding 'BLERICK-3 voor doorsnede 100 (frame a en d), 230 (frame b en e) en 360 (frame c en f). Bovenste rij: grijswaarden, onderste rij: resultaat van beeldanalyse beschreven in hoofdsuk 2.

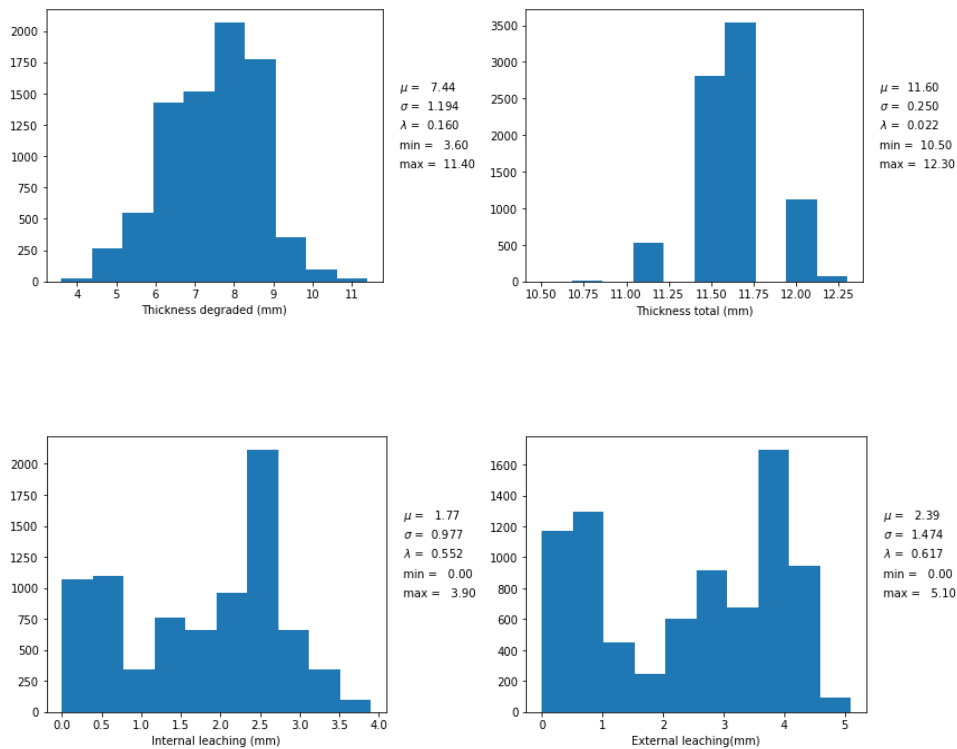


Figuur 17. Histogrammen voor restwanddikte (T), totale wanddikte (D), mate van interne (U_{in}) en externe (U_{ext}) uitloging voor leiding BLERICK-3.

D09586-1 (Uitlogingstype II)



Figuur 18. Uitlogingsprofielen in omtrek-richting voor leiding D09568-1 voor doorsnede 100 (frame a en d), 230 (frame b en e) en 360 (frame c en f). Bovenste rij: grijswaarden, onderste rij: resultaat van beeldanalyse beschreven in hoofdsuk 2.



Figuur 19. Histogrammen voor restwanddikte (T), totale wanddikte (D), mate van interne (U_{int}) en externe (U_{ext}) uitloging voor leiding D09568-1.