



Bedrijfstakonderzoek
BTO 2023.087 | November 2023

Röntgentomografie als meetmethode voor toestandsbepaling van PVC-leidingen

Colofon



Röntgentomografie als meetmethode voor toestandsbepaling van PVC-leidingen

BTO 2023.087 | November 2023

Dit onderzoek is onderdeel van het collectieve Bedrijfstakonderzoek van KWR, de waterbedrijven en Vewin.

Opdrachtnummer

402045/336

Projectmanager

I. (Ina) Vertommen MSc

Opdrachtgever

BTO - Thematisch onderzoek - Distributie

Auteur(s)

dr. ir. A. (Amitosh) Dash, dr. ir. K.A. (Karel) van Laarhoven

Kwaliteitsborger(s)

dr. ir. E.J.M. (Mirjam) Blokker

Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.

Een jaar na publicatie is het openbaar.

Keywords

PVC, leidingconditie, scheurgroei, röntgentomografie, toestandsbepaling

Jaar van publicatie

2023

Meer informatie

dr. ir. Karel van Laarhoven

T 030-6069697

E karel.van.laarhoven@kwrwater.nl

PO Box 1072

3430 BB Nieuwegein

The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511

E info@kwrwater.nl

I www.kwrwater.nl

KWR

November 2023 ©

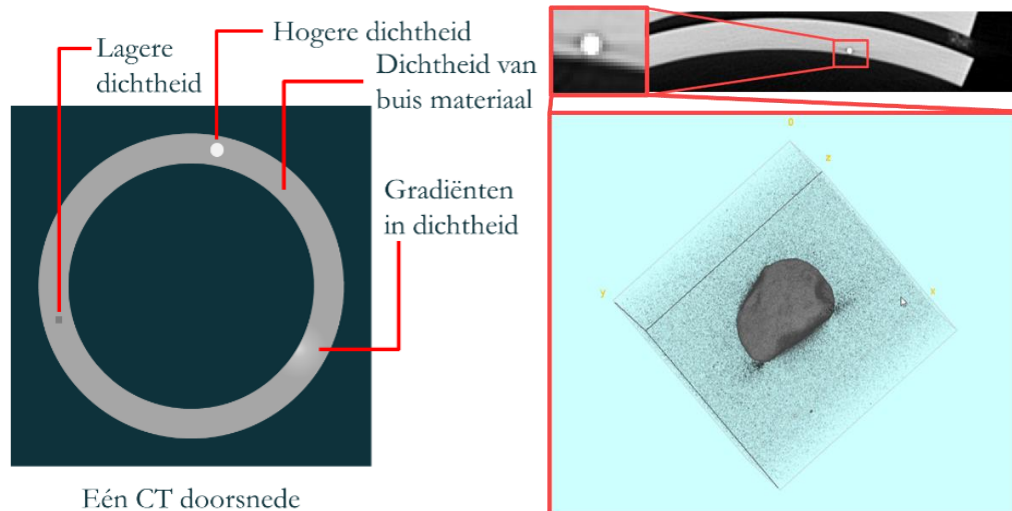
Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

Managementsamenvatting

CT-scans van PVC zijn een potentiële game-changer voor conditieonderzoek

Auteur(s) dr. ir. A. (Amitosh) Dash, dr. ir. K.A. (Karel) van Laarhoven.

Met behulp van Röntgen computertomografie (CT-scans) konden insluitsels in PVC-buisdelen worden vastgesteld. Dit is een belangrijke ontwikkeling voor de conditiebepaling van PVC-leidingen, omdat insluitsels een hoofdrol spelen in het belangrijkste faalmechanisme van PVC, scheurgroei. Tot nu toe waren er nog geen mogelijkheden om deze deeltjes op te sporen. Met CT kunnen drinkwaterbedrijven de materiaalkwaliteit van hun meest gebruikte leidingmateriaal in kaart gaan brengen via exitbeoordelingen en kunnen ze de ontwikkeling van andere meettechnieken voor in-line inspecties ondersteunen, valideren en beoordelen.



Links: een schematische weergave van wat er te zien is in een CT-doorsnede van een PVC-buisdeel. Rechts: boven een CT-doorsnede van een PVC-proefstuk, met in de uitsnede duidelijk een insluitel zichtbaar. Onder een reconstructie van het ingesloten deeltje op basis van micro-CT.

Belang: het dominante faalmechanisme meten voor het dominante leidingmateriaal

PVC is het meest toegepaste materiaal in Nederlandse drinkwaterleidingen. Om leidingen van dit materiaal goed te kunnen blijven beheren, is het belangrijk om de conditie en veroudering van deze leidingen te begrijpen en te kunnen volgen/toetsen met metingen. Het dominante verouderingsproces van PVC-leidingen is scheurgroei. Een belangrijke oorzaak voor die scheurgroei zijn insluitsels van ongewenste materialen (bijv. zand, ijzer, slecht verwerkt PVC) die het begin kunnen vormen van microscheurtjes die op den duur kunnen uitgroeien

tot een lek. De aanwezigheid van dergelijke insluitsels of beginnende scheurtjes was tot nu toe niet te bepalen met een sensortechniek: het meten van de deeltjes zelf is uitdagend, en daarnaast zijn de deeltjes zeldzaam, zodat het zoeken is naar een speld in een hooiberg.

Aanpak: Röntgentomografie (CT-scans) uitproberen op uitgenomen buisdelen

Röntgentomografie (CT-scans) is een methode die bij uitstek geschikt is om 'naar het binnenste van materialen te kijken' en om verschillende materialen van elkaar te onderscheiden. In dit onderzoek wordt

beproefd of CT-scans kunnen worden gebruikt om insluitsels, microscheurtjes of andere wetenswaardigheden te vinden in 20 uitgenomen PVC-buisdelen met aanlegjaren tussen 1960 en 2020. Het Microlab aan de Technische Universiteit heeft de metingen uitgevoerd met een medische scanner en met een hoge-resolutie micro-CT.

Resultaten: met CT-scans is het mogelijk om insluitsels te meten in PVC

Uit de metingen blijkt dat insluitsels in PVC met CT te detecteren zijn. De meeste leidingen bevatte enkele deeltjes; enkele leidingen bevatte een groot aantal insluitsels. Hoewel de deeltjes in dit onderzoek niet chemisch zijn geïdentificeerd, blijkt het mogelijk om verschillende typen deeltjes van elkaar te onderscheiden qua omvang en vorm. Het kunnen meten van dit soort insluitsels in het PVC is potentieel een belangrijke ontwikkeling voor het onderzoek naar de conditie van het PVC-leidingnet, omdat deze insluitsels dominant zijn in het scheurgroei proces, terwijl er tot nog toe geen mogelijkheden waren om deze deeltjes op te sporen.

Toepassing: gebruik CT voor conditiebepaling en om andere technieken te valideren

CT geeft, ten eerste, de mogelijkheid om gericht onderzoek te doen naar de aanwezigheid, eigenschappen en impact van insluitsels in PVC.

Ten tweede kan CT in de toekomst ook een methode bieden voor exitbeoordelingen van de kwaliteit van leidingmaterialen. Hiervoor moet eerst worden uitgezocht hoe de gedetecteerde insluitsels precies kunnen worden vertaald naar een kans op falen of levensduur.

Ten derde kan CT ook ingezet worden om de ontwikkeling van andere meettechnieken voor leidinginspectie te ondersteunen en – minstens zo belangrijk – te valideren.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Röntgentomografie als meetmethode voor toestandsbepaling van PVC-leidingen* (BTO 2023.087).

Inhoud

Colofon	2
<i>Managementsamenvatting</i>	3
Inhoud	6
1 Inleiding	7
1.1 Motivatie en doel	7
1.2 Aanpak en leeswijzer	7
2 CT-scans van PVC-defecten in de literatuur	8
3 Methode	9
3.1 Inleiding	9
3.2 Herkomst en voorbereiding van de verzamelde proefstukken	9
3.3 Metingen met een lage-resolutie medische CT-scanner	10
3.4 Handmatige analyse van de lage-resolutie CT-beelden	11
3.5 Metingen met een hoge-resolutie CT-scanner	12
4 Resultaten	13
4.1 Lage-resolutie CT-scans van 20 proefstukken	13
4.2 Enkele bijzonderheden waarop is ingezoomd met de micro-CT	17
4.2.1 Holten in proefstuk #04	17
4.2.2 Insluitsels in proefstuk #04	17
4.2.3 Insluitsels in proefstuk #08	19
4.3 Discussie	19
5 Conclusies, bedrijfsparagraaf en aanbevelingen	21
5.1 Conclusies	21
5.2 Bedrijfsparagraaf	21
5.3 Aanbevelingen	22
6 Referenties	23

1 Inleiding

1.1 Motivatie en doel

PVC is het meest toegepaste materiaal in Nederlandse drinkwaterleidingen. Om leidingen van dit materiaal goed te kunnen blijven onderhouden en op het juiste moment te vervangen, is het belangrijk om de conditie en veroudering van deze leidingen te begrijpen en te kunnen volgen/toetsen met metingen. Het dominante verouderingsproces van PVC-leidingen is scheurgroei. Een belangrijke oorzaak voor die scheurgroei zijn insluitels, ingesloten deeltjes van vreemd materiaal (zand, ijzer, slecht verwerkt PVC, etc.) die het begin kunnen vormen van microscheurtjes die op den duur kunnen uitgroeien tot een lek (van Laarhoven, 2020; van Laarhoven, 2022). De aanwezigheid van dergelijke insluitels of beginnende scheurtjes is momenteel niet te bepalen met een sensortechniek: het meten van de deeltjes zelf is uitdagend, en daarnaast zijn de deeltjes zeldzaam, zodat het zoeken is naar een speld in een hooiberg.

Röntgentomografie (CT-scans) is een methode die bij uitstek geschikt is om 'naar het binnenste van materialen te kijken' en om verschillende materialen van elkaar te onderscheiden. CT is in het recente verleden succesvol toegepast om de degradatie van asbestcement als leidingmateriaal in kaart te brengen (van Laarhoven en Quintiliani, 2020; van Steen, Holzhaus en van Laarhoven, 2021). Het doel van dit onderzoek was te toetsen of insluitels, microscheuren of andere wetenswaardigheden in een PVC-buis kunnen worden gevonden met CT-scans.

1.2 Aanpak en leeswijzer

Met behulp van een korte literatuurstudie is eerst uitgezocht wat andere onderzoekers al te weten zijn gekomen over het meten van scheuren en insluitels in kunststof met behulp van CT. De uitkomsten zijn samengevat in hoofdstuk 2. Daarnaast hebben verschillende drinkwaterbedrijven proefstukken uit het leidingnet gehaald. De proefstukken zijn eerst gescand met een lage-resolutie CT-scanner. Enkele bijzonderheden die daarbij in de proefstukken werden aangetroffen zijn vervolgens nader onderzocht met een hoge-resolutie micro-CT. Het verzamelen van de proefstukken en de meetmethoden zijn toegelicht in hoofdstuk 3. De uitkomsten van de metingen zijn beschreven in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 staan de belangrijkste conclusies en aanbevelingen die volgen uit dit onderzoek.

2 CT-scans van PVC-defecten in de literatuur

De verwachte toepassing van CT is het opsporen van afwijkingen in de bulk van een materiaal, zoals haarscheurtjes, insluitsels, imperfecties, of dichtheidsverschillen. Dat is waardevol omdat scheurgroei rond dergelijke imperfecties een van de dominante faalmechanismen van PVC-leidingen is (van Laarhoven, 2020; van Laarhoven, 2022). Een bron van dergelijke insluitsels zit in de aanwezigheid van niet-PVC deeltjes die tijdens productie onbedoeld in het PVC-granulaat terechtkomen. Chen en collega's (2022) wisten dat soort deeltjes via videomicroscopie in combinatie met geautomatiseerde beeldverwerking op te sporen.

In een recente overzichtsstudie m.b.t. PVC-rioolleidingen is een verzameling van PVC-rioolleidingen mechanisch en chemisch beproefd (Makris et al., 2020). Onder andere is daarbij de hoeveelheid oppervlakkige defecten/onregelmatigheden met een CCTV-camera onderzocht. In tabel 2 van die studie is een overzicht van methodes om PVC-materiaal te testen samengevat. Daarin is geen verwijzing naar CT-scans. Ook breder is er in de wetenschappelijke literatuur niets gevonden over het toepassen van CT-scans op PVC-leidingen.

In een studie van Gould en anderen (2013) is een uitgebreide exitbeoordeling van een gefaalde PVC-U rioolleiding gedaan. De leiding heeft gefaald op een leeftijd van 34 jaar terwijl een levensduur van >100 jaar werd verwacht. Op basis van visuele analyse is vastgesteld dat de scheurgroei startte bij een insluiting die geïntroduceerd is tijdens productie. Er is verondersteld dat de scheurgroei in twee stappen heeft plaats gevonden: eerst initiatie en langzame scheurgroei, dan snelle scheurgroei (RCP). De scheur is bij een holte begonnen; het is onduidelijk of er ook een deeltje zat dat tijdens het breukproces is verdwenen. In totaal zijn 15 defecten gevonden, waarvan er één met een Energy Dispersive X-ray spectrometer¹ is geanalyseerd. Daarmee was het mogelijk om de samenstelling van het defect te achterhalen (ijzer en chroom, in dit geval).

In een recente overzichtsstudie over het scheuren en bezwijken van polymeerstructuren is CT gebruikt voor de beeldvorming (Awaja et al., 2016). Met X-ray radiography (2D plaatje) kunnen insluitsels, scheuren, holtes, en vezeleigenschappen zoals richting en splitsing (in het geval van vezelversterkte kunststoffen) gedetecteerd worden. Met X-ray micro-CT konden (haar)scheuren en holtes gevisualiseerd worden. De 3D-beelden vanuit micro-CT legden de aard en vorm van insluitsels en defecten bloot. In tabel 6 van deze studie is een overzicht van kwantitatieve metingen van defecten in polymeer composieten met CT weergegeven (inclusief meetresoluties). Er zijn ook studies (Shang et al., 2020) waarin stalen proefstukken met kunstmatig toegevoegde insluitsels zijn geanalyseerd met micro-CT. Het is de verwachting dat deze toepassing ook voor PVC bruikbaar zal zijn.

Hoewel er geen studies zijn gevonden waarin CT-scans van PVC-drinkwaterleidingen zijn gemaakt, bestaan er wel studies waarin PVC als materiaal met CT geanalyseerd is. Een voorbeeld van zo'n studie wordt beschreven door Olufsen et al. (2020). Daarin zijn proefstukken met inkepingen van verscheidene krommingen in een trekbank onder trekspanning gebracht. Vervolgens zijn de stukken met CT geanalyseerd. Met de CT-scans zijn relatieve dichtheden zichtbaar gemaakt, waardoor de plastische vervormingen van de proefstukken bij verschillende behandelingen konden worden vergeleken. In een andere studie over het toepassen van een micro-CT scanner werden met CT dichtheidsverschillen in het materiaal van een PVC-buis geanalyseerd (Vilar et al., 2017).

¹ N.B. X-ray spectroscopie betreft een andere toepassing van röntgenstraling dan röntgentomografie.

3 Methode

3.1 Inleiding

Er zijn in totaal twintig proefstukken verzameld van vijf drinkwaterbedrijven. Proefstukken werden vervolgens eerst gescand met een ‘reguliere’ medische CT-scanner. Qua tijd voltrok dit zich in twee aparte rondes met ieder tien proefstukken. Dit gaf de mogelijkheid om op basis van de resultaten uit de eerste ronde gerichter proefstukken voor de tweede ronde te verzamelen. Uit de scans met de medische scanner zijn een aantal bijzonderheden geselecteerd waarop vervolgens is ingezoomd met een ‘micro-CT-scanner’ met een veel hogere resolutie.

3.2 Herkomst en voorbereiding van de verzamelde proefstukken

In Tabel 1 (Hoofdstuk 4) zijn de twintig stukken en de benodigde voorbereiding samengevat. De herkomst van de verschillende proefstukken is als volgt:

- Proefstukken 1, 3, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 en 15, 18, 19 zijn afkomstig uit een saneringsproject van een drinkwaterbedrijf.
- Proefstukken 2, 5 en 6 zijn (als bijvangst) uitgenomen naar aanleiding van een onderzoeksproject gericht op de conditiebepaling van verbindingen en appendages.
- Proefstuk 7 is afkomstig uit een saneringsproject naar aanleiding van vervuilde bodem.
- Proefstukken 4 en 20 zijn uitgenomen naar aanleiding van storing op de betreffende leiding.
- Proefstukken 16 en 17 zijn ‘als nieuw’ aangeleverd vanuit het magazijn van een drinkwaterbedrijf.

De aangeleverde proefstukken zijn waar nodig voorbereikt, zodat deze in de CT-scanner zouden passen. De volgende stappen zijn doorlopen (ook geïllustreerd in Figuur 1):

- Na uitname (Figuur 1a) zijn de proefstukken eerst met water en borstel schoongemaakt om deze te ontdoen van zand (zand kan een negatief effect hebben op de CT-metingen).
- Buizen werden waar nodig in de lengte op maat gezaagd, zodat er geen proefstukken van langer dan een meter overbleven (Figuur 1f). Proefstukken die een diameter van meer dan 200 mm hebben, werden in repen gezaagd (Figuur 1h). Een aantal repen worden vervolgens op elkaar gestapeld. Daarbij zijn houten tussenstukken tussen de repen geplaatst zodat deze elkaar niet raken tijdens de CT-meting (Figuur 1c, d en g, hout is in de CT-meting gemakkelijk te onderscheiden van PVC). Vóór het zagen werden de snijvlakken met een stift afgetekend en werd hun oriëntatie op de buis gemarkeerd. De gestapelde repen werden met schilderstape tot één proefstuk gebundeld. De volgorde van de repen werd ook met behulp van schilderstape op de stukken gemarkeerd – bijvoorbeeld “Bovenste stuk” of “tweede laagste stuk”. Dit was een voorzorgmaatregel in het geval dat de repen loskomen.
- Bij een paar proefstukken waren reparatieklemmen aanwezig (Figuur 1e). In de tweede ronde van metingen zijn deze verwijderd omdat de klemmen de CT-metingen tijdens de eerste ronde sterk bleken te verstoren.
- Bij elk proefstuk werd met behulp van schilderstape zowel de bovenkant van het proefstuk als de richting waarin de scan uitgevoerd zou worden gemarkeerd (Figuur 1b). Hierdoor kon de relatie tussen de metingen en het fysieke proefstuk worden behouden.

- Op elk proefstuk werd een etiket geplakt om het stuk te identificeren. Vervolgens werden de stukken in een vuilniszak verpakt, met schilderstape gesloten. Ook op de vuilniszakken werden etiketten geplakt.
- De proefstukken werden tenslotte op een pallet verzameld voor vervoer naar het laboratorium waar de CT-metingen zijn uitgevoerd (Figuur 1i).



Figuur 1. (a) Uitname van een proefstuk tijdens een saneringsproject. (b) Markering van meest interessante gebied op een proefstuk met een gescheurd zadel. (c) In stukken gezaagde steekmof die tot één proefstuk zullen worden gestapeld met houten tussenstukken. (d) In repen gezaagd buisdeel dat tot één proefstuk gestapeld zal worden met houten tussenstukken. (e) Proefstuk met reparatieklem. (f) Proefstukken die in zijn geheel in CT-scanner geplaatst kunnen worden. (g) Buisdelen die doormidden worden gezaagd hebben een relatief dik houten tussenstuk nodig om de repen te kunnen stapelen. (h) Zagen van het grootst proefstuk. (i) De eerste tien proefstukken, verpakt en verzameld op een pallet.

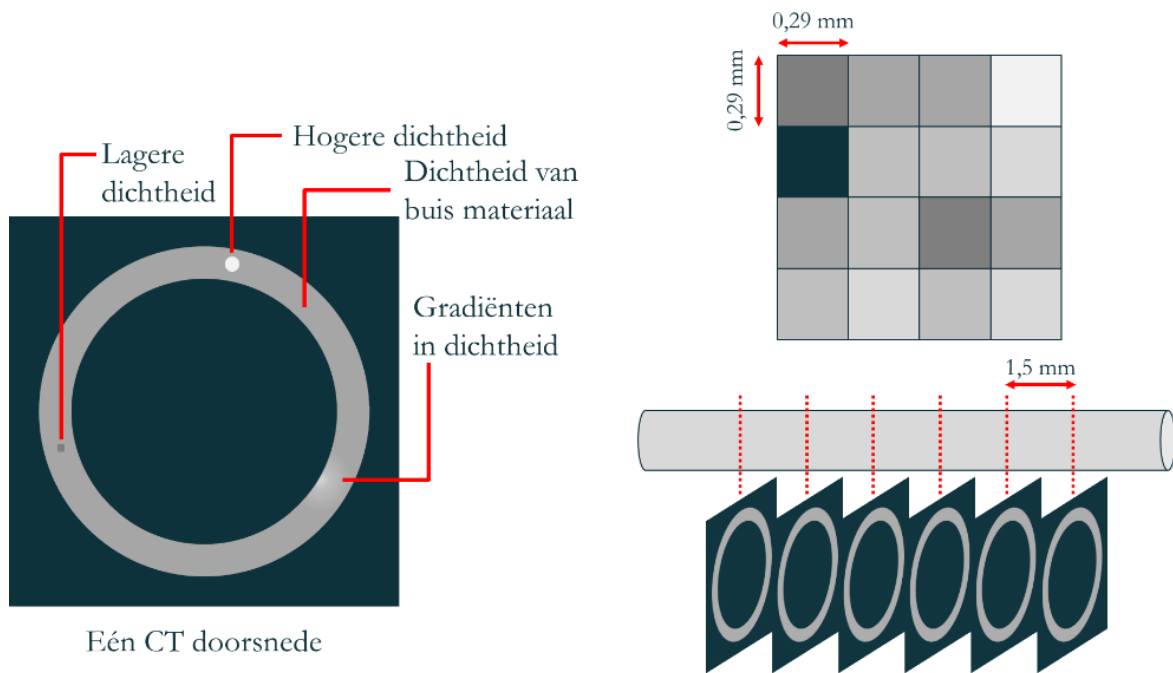
3.3 Metingen met een lage-resolutie medische CT-scanner

Lage-resolutie scans van alle 20 proefstukken 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. De afmetingen van de doorsnede werden bepaald met de Field of View (FOV), die werd afgestemd op de omvang van het proefstuk. De kleinst mogelijke FOV was 150 mm x 150 mm. Een afbeelding wordt altijd gemeten met een resolutie van 512 pixels in iedere richting, dus de keuze voor een bepaalde FOV bepaalt de resolutie van de meting. De resolutie van de meting is daarom per proefstuk gerapporteerd in Tabel 1.

3.4 Handmatige analyse van de lage-resolutie CT-beelden

De lage-resolutie CT-metingen resulteerden per proefstuk in een verzameling afbeeldingen van opeenvolgende dwarsdoorsneden (zie Figuur 2). Deze beelden zijn vervolgens visueel beoordeeld om een indruk te krijgen van hetgeen in de beelden kan worden aangetroffen. Elke dwarsdoorsnede vertegenwoordigt een aparte locatie in de axiale richting van het proefstuk. Elke afbeelding is een verzameling van pixels met een grijswaarde. De grijswaarde van de pixel komt daarbij overeen met de radiodichtheid van een volume-elementje van het materiaal met afmetingen die afhangen van de ingestelde resolutie, en de fysieke afstand tussen elk plaatje is 1,5 mm.

Figuur 2 geeft een indicatie van de zaken die typisch in een dwarsdoorsnede worden gevonden: de PVC-buis is te herkennen als een ring van min of meer homogene grijswaarde, eventueel met daarin een lichte gradiënt. Daarnaast komen kleine gebieden met een hogere intensiteit of een lagere intensiteit voor. Dit duidt erop dat daar een materiaal aanwezig is met een respectievelijk hogere of lagere (radio)dichtheid, vermoedelijk insluitsels of holtes. CT-scanners kunnen typisch goed worden gekalibreerd om verschillende materialen te identificeren aan de hand van de grijswaarde, via de zogenaamde *Hounsfield schaal*, maar die stap viel voorbij de strekking van dit onderzoek.

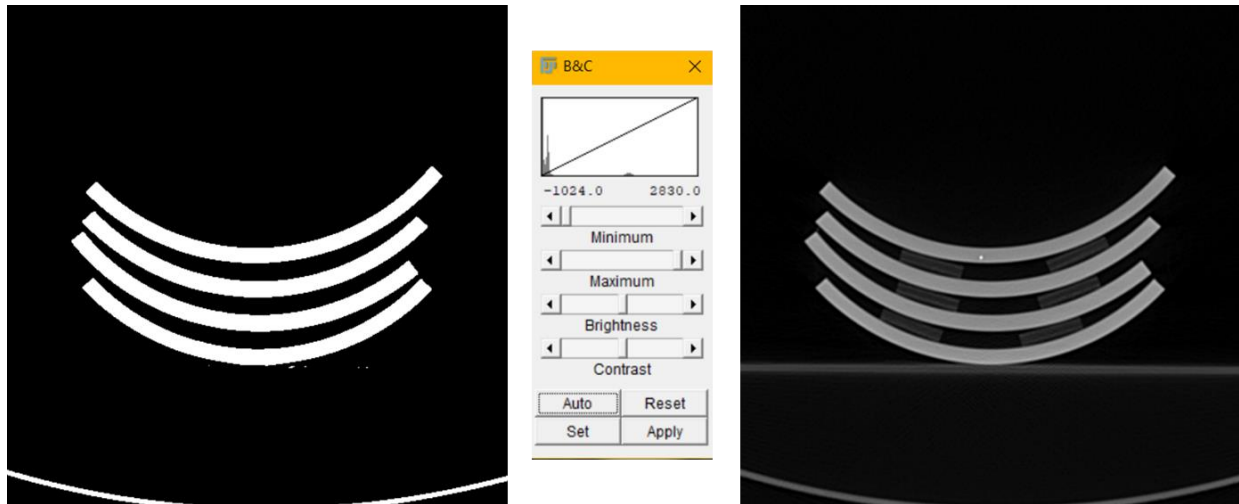


Figuur 2. Schematisch overzicht van de ruwe uitkomsten uit een CT-meting.

De analyse van de scans betrof doornemen van plaatjes met behulp van het open-source beeldverwerkingspakket ImageJ (Fiji implementatie). Het proces was als volgt:

- een serie dwarsdoorsneden wordt ingeladen als *image sequence*;
- het begin van de buis wordt opgezocht (vaak zijn de eerste paar en de laatste paar afbeeldingen in de meting leeg);
- met de opties *Image > Adjust > Brightness/Contrast* wordt de visualisatie aangepast om de extreme waarden (materiaal met hoge en lage dichtheid) goed zichtbaar te maken (geïllustreerd in Figuur 3);
- tenslotte worden de opeenvolgende afbeeldingen handmatig afgelopen en zorgvuldig bekeken. Als er een bijzonderheid wordt gezien, wordt het nummer van de doorsnede in combinatie met een screenshot bewaard.

Op bovenstaande wijze zijn ongeveer 30.000 doorsneden beoordeeld. Dit is een tijdrovend proces en de beelden konden alleen oppervlakkig worden beoordeeld. In de toekomst zou deze taak vereenvoudigd kunnen worden door middel van het opstellen van een computerscript voor automatische beeldverwerking. De voorliggende analyse is derhalve kwalitatief en niet uitputtend, maar geeft een goede eerste indruk van wat er wordt aangetroffen in de beelden.



Figuur 3. Ten opzichte van de originele weergave (links) kan het contrast aangepast worden (midden) om bijzonderheden zoals insluitsels beter zichtbaar te maken (rechts).

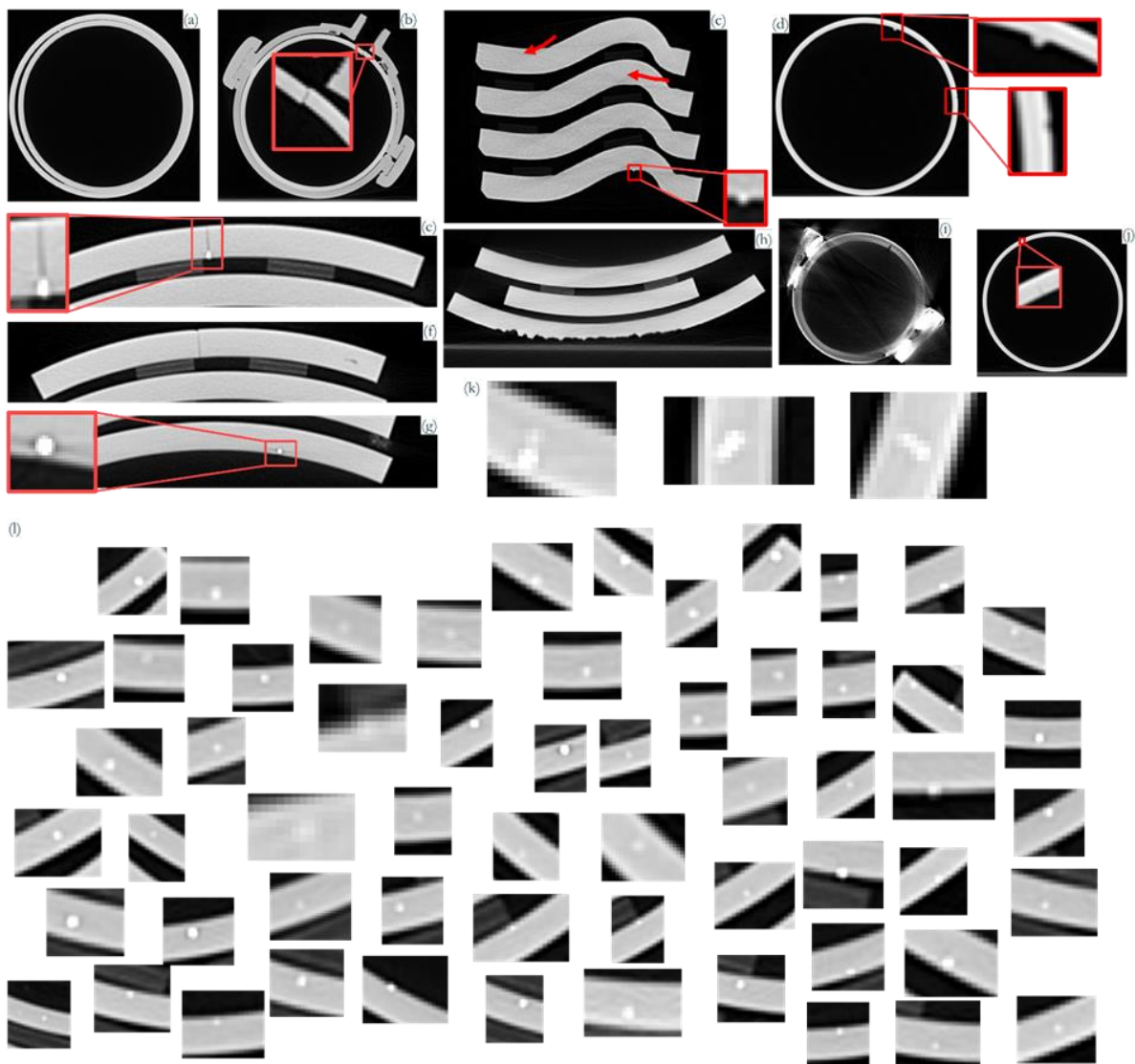
3.5 Metingen met een hoge-resolutie CT-scanner

Na de analyse van de metingen verkregen met de medische scanner is besloten om op enkele bijzonderheden in proefstukken #4 en #8 (holtes en insluitsels) in te zoomen met een hoge-resolutie micro-CT. Daartoe werden cilinders met een doorsnede van 25 mm uit de buiswand geboord met een holle kernboor, om een proefstuk te maken dat in de micro-CT paste. De micro-CT was van het type CoreTOM van het merk TESCAN XRE en kon meten met een resolutie tot 0.006 mm per pixel; ruim genoeg om insluitsels duidelijk te meten (insluitsels hebben een typische lengteschaal van 0.2 tot 2 mm (van Laarhoven, 2020); de onregelmatigheden in de bulk van PVC hebben een typische lengteschaal tot 0.04 mm).

4 Resultaten

4.1 Lage-resolutie CT-scans van 20 proefstukken

De voornaamste waarnemingen in de lage-resolutie CT-scans zijn de insluitels (een gebiedje met een (radio)dichtheid hoger dan die van PVC wordt beschouwd als insluiting in het materiaal). Daarnaast zijn er ook andere bijzonderheden gezien. Enkele van deze waarnemingen zijn geïllustreerd in Figuur 4.



Figuur 4. Voorbeelden van waarnemingen in CT-scans. (a) Scheve plaatsing van buis in mof bij proefstuk #01. (b) Detail van schade op de buis bij proefstuk #02. (c) Insluiting en gradiënten in de grijswaarden van het PVC gezien in proefstuk #05 (d). Afwijkingen in de buiswand bij proefstuk #10. (e) Aanwezigheid van hoge-dichtheid materiaal op locatie van de scheur in proefstuk #04. (f) Aanwezigheid van holte in proefstuk #04. (g) Insluiting en lage-dichtheid gebied eromheen in proefstuk #04. (h) Vorm van erosiekrater bij proefstuk #06. (i) Degradatie van de beeldkwaliteit wegens een (metalen) zadel in proefstuk #09. (j) Verborgen scheur bij proefstuk #19. (k) Aanwezigheid van meerdere insluitels echt dichtbij elkaar in proefstuk #15. (l) Deelverzameling van een grote hoeveelheid insluitels in proefstuk #08.

De belangrijkste waarnemingen zijn per proefstuk samengevat in Tabel 1. De belangrijkste type waarnemingen zijn hieronder per groep kort uitgelegd.

Insluitsels:

- Insluitsels zijn defecten die als bronnen van scheurgroei kunnen dienen. Het beste voorbeeld hiervan lijkt proefstuk #04 te zijn, waarbij een insluiting zichtbaar is in het midden van de scheur (in opeenvolgende dwarsdoorsnedes), zie ook Figuur 4e. Mede op basis hiervan is gekozen om op proefstuk #04 in te zoomen met de micro-CT.
- Insluitsels zijn in de meerderheid van de proefstukken waargenomen, zelfs in gloednieuwe stukken (zoals proefstuk #17). De stukken met de meeste insluitels komen uit de jaren '60 en '70, maar er zijn ook proefstukken uit deze periode die geen of een gering aantal insluitels hebben. De jongere proefstukken lijken minder insluitels te hebben.
- Proefstuk #08 heeft opmerkelijk veel insluitels (> 100). Op basis hiervan is gekozen om op proefstuk #08 in te zoomen met de micro-CT. Vermeldenswaardig is dat dit buisdeel nog niet heeft gestoord (Figuur 4L). Proefstukken #9, #18 en #19 komen uit dezelfde straat en hebben dezelfde diameter en jaar van aanleg, maar hebben veel minder insluitels.
- In sommige gevallen zijn 'insluitels' zichtbaar op de rand van de buiswand, zoals in Figuur 4c. In die gevallen is het niet uit te sluiten dat het gaat om vuil dat aan de buiswand zit geplakt.
- Er zijn ook insluitels in de afdichtring van een steekmof waargenomen (proefstuk #01).
- Er zijn voorbeelden waarin het erop lijkt dat meerdere insluitels zeer dichtbij elkaar liggen, bijvoorbeeld proefstuk #15, zoals afgebeeld in Figuur 4k.

Overige waarnemingen:

- Bij verbindingen kan scheve plaatsing van de buisstukken in de mof duidelijk worden herkend, bijvoorbeeld in proefstuk #01, zoals afgebeeld in Figuur 4a.
- Schade is duidelijk zichtbaar, zoals Figuur 4b (scheur), Figuur 4d (krassen), en Figuur 4h (erosie).
- Vooral in proefstuk #04 zijn een paar voorbeelden van 'inwendige holten' gevonden (Figuur 4f), hoewel niet duidelijk is of het hier werkelijk een holte betreft, of een ingesloten deeltje met een lagere dichtheid dan die van PVC. Mede op basis hiervan is gekozen om op proefstuk #04 in te zoomen met de micro-CT.
- Bij proefstuk #05 zijn gradiënten in de grijswaarden van het PVC zichtbaar op de plekken waar het PVC tijdens productie is vervormd (om van een geëxtrudeerde buis een steekmof te maken), zie ook Figuur 4c. Het is niet duidelijk of deze gradiënten overeenkomen met daadwerkelijke verschillen in dichtheid van het PVC of dat het artefacten in de CT-metingen zijn.
- Er is gezien dat de aanwezigheid van een reparatieklem in de CT-plaatjes nadelig is voor de beeldkwaliteit, zie Figuur 4i (proefstuk #09). Dit was de reden om van proefstukken #18, #19 de reparatieklem te verwijderen voor de CT-scan. Bij proefstuk #18 is er tijdens het verwijderen van de reparatieklem een scheur visueel waargenomen, voor proefstuk #19 niet. In de CT-scan voor proefstuk #19, is wel een kleine scheur waargenomen (Figuur 4j).

Tabel 1. Samenvatting van eigenschappen en observaties per proefstuk.

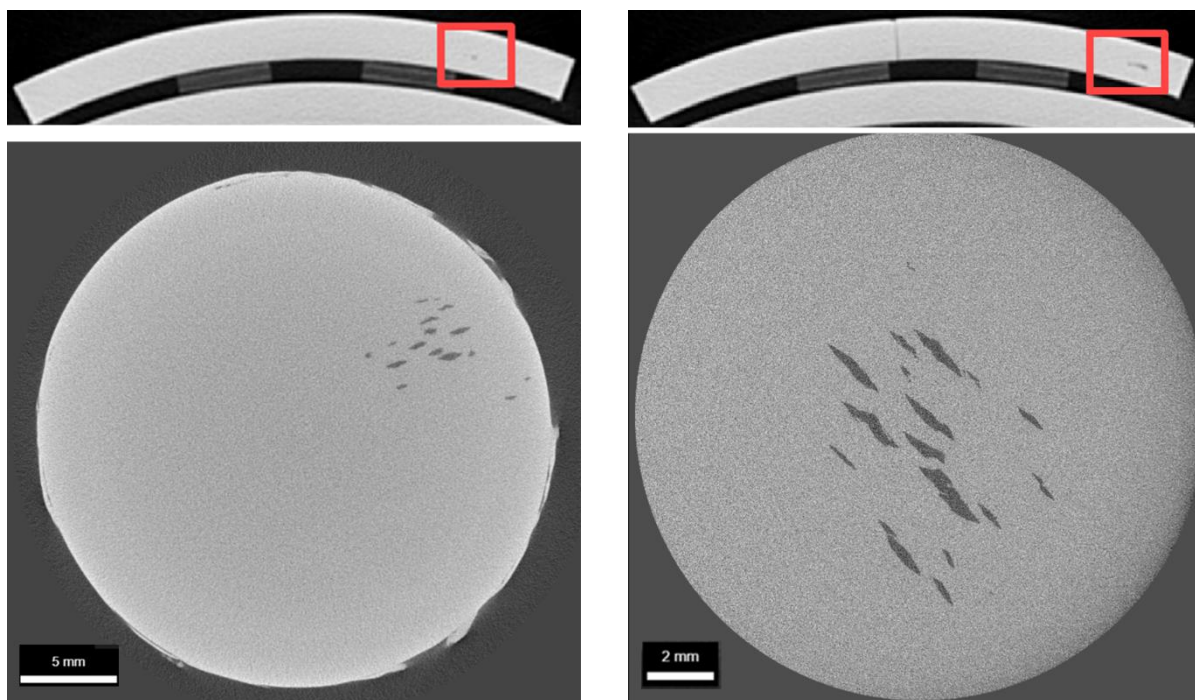
#	Drinkwaterbedrijf (Locatie)	Aanlegjaar	Diameter	Type onderdeel (geschiedenis)	Vorbewerking	Aantal insluitsels (# frames / pixel size)	Aanvullende opmerkingen
01	Evides (Rotterdam, Gerrit van de Lindestraat)	1967	110 mm	Buis + steekmof (gesaneerd)	Op lengte gezaagd	40 (buis), 9 (rubber) (1100 frames / 0.49 mm)	Scheve plaatsing van mof in buis; inhomogeniteit van wanddikte
02	Evides (Rotterdam, Palestinastraat)	1970	160 mm	Buisdeel + zadel (storing zadel)	-	43 (887 frames / 0.49 mm)	Erosiekraters in de buis en zadel van wege lekkage op de afdichting van het zadel.
03	Evides (Rotterdam, Kortenaerstraat)	1973	110 mm	Buisdeel (gesaneerd)	Op lengte gezaagd	6 (1459 frames / 0.49 mm)	-
04	Evides (Spijkenisse, Provincialeweg)	1973	400 mm	Buisdeel (storing)	In 8 repen gezaagd (4 geanalyseerd)	27 (1163 frames / 0.39 mm)	Enkele holtes; scheur, insluiting die waarschijnlijk tot scheurgroei heeft geleid zichtbaar in scheur.
05	Vitens (Aalten, Varsseveldsestraatweg,)	2000	500 mm	Steekmof (lekke verbinding)	In 8 schelpen gezaagd (4 geanalyseerd)	1 oppervlakkig (305 frames / 0.39 mm)	-
06	Vitens (Aalten, Rosierweg)	2000	500 mm	Steekmof (lekke verbinding)	In 8 repen gezaagd (3 geanalyseerd)	1 (1081 frames / 0.58 mm)	Erosie vanwege lekkage op de afdichting van de steekmof zichtbaar
07	Vitens (?)	(?)	(?)	Buisdeel (Xyleen bodem gesaneerd)	In 4 repen gezaagd	1 oppervlakkig (654 frames / 0.58 mm)	-
08	Brabant Water (Stampersgat, Noordzeedijk)	1975	200 mm	Buisdeel (gesaneerd)	In 4 repen gezaagd	140 (1507 frames / 0.39 mm)	
09	Brabant Water (Stampersgat, Noordzeedijk)	1975	200 mm	Buisdeel + klem (gesaneerd)	-	0 (1447 frames / 0.78 mm)	Beeldkwaliteit laag; uitgeboorde scheurtips zichtbaar maar scheur niet
10	Brabant Water (Gilze-Rijen, Mosselaar)	1974	110 mm	Buisdeel (gesaneerd)	Op lengte gezaagd	0 (1494 frames / 0.29 mm)	Kleine afwijkingen (krassen) in buiswand

#	Drinkwaterbedrijf (Locatie)	Aanlegjaar	Diameter	Type onderdeel (geschiedenis)	Vorbewerking	Aantal insluitsels (# frames / pixel size)	Aanvullende opmerkingen
11	WML (Weert, Diesterbaan)	1966	110 mm	Buisdeel (gesaneerd)	-	5 (1000 frames / 0.29 mm)	Kleine afwijkingen (krassen) in buiswand
12	WML (Weert, Diesterbaan #27)	1965	200 mm	Buisdeel (gesaneerd)	-	83 (941 frames / 0.58 mm)	
13	WML (Weert, Diesterbaan / Nelissenhofweg)	1972	250 mm	Buisdeel (gesaneerd)	In 2 repen gezaagd	7 (1329 frames / 0.58 mm)	
14	WML (Weert, Middelstestraat)	1971	200 mm	Buisdeel (gesaneerd)	-	1 (+10 oppervlakkig) (1267 frames / 0.58 mm)	Kleine afwijkingen (krassen) in buiswand en hoge-dichtheid 'insluitsels' op de buiswand.
15	WML (Weert, Graafschap Hornelaan #151)	1970	200 mm	Buisdeel (gesaneerd)	-	46 (1355 frames / 0.58 mm)	Aantal locaties waar twee insluitsels dicht op elkaar zitten
16	WML (Magazijn)	2016	160 mm	Buisdeel (nieuw)	-	0 (1673 frames)	
17	Brabant Water (Magazijn)	2022	500 mm	Buisdeel (nieuw)	In 8 repen gezaagd (4 geanalyseerd)	1 (1689 frames / 0.58 mm)	
18	Brabant Water (Stampersgat, Noordzeedijk)	1975	200 mm	Buisdeel + klem (gesaneerd)	Klem verwijderd, op lengte gezaagd	13 (1583 frames / 0.58 mm)	Scheur zichtbaar
19	Brabant Water (Stampersgat, Noordzeedijk)	1975	200 mm	Buisdeel + klem (gesaneerd)	Klem verwijderd, op lengte gezaagd	15 (1283 frames / 0.58 mm)	Scheur zichtbaar
20	PWN (?)	1975	200 mm	Buisdeel (storing)	Op lengte gezaagd	0 (480 frames / 0.58 mm)	Vorm van breukvlak zichtbaar

4.2 Enkele bijzonderheden waarop is ingezoomd met de micro-CT

4.2.1 Holten in proefstuk #04

In proefstuk #04 zijn op verschillende locaties in de buiswand holtes (of regio's met een lage dichtheid) gedetecteerd. Doorsneden gemaakt met de micro-CT laten zien dat het hier in beide gevallen niet om één holte gaat, maar om een cluster van kleinere holtes (Figuur 5). De holtes zijn allen langgerekt en gelijkgericht; het is niet duidelijk hoe de oriëntatie is ten opzichte van de buis en de belasting van de buis. Merk op dat de foto's met verschillende resoluties genomen zijn (schaalaanduidingen in Figuur 5); de holtes hebben een vergelijkbare lengteschaal in beide gevallen.



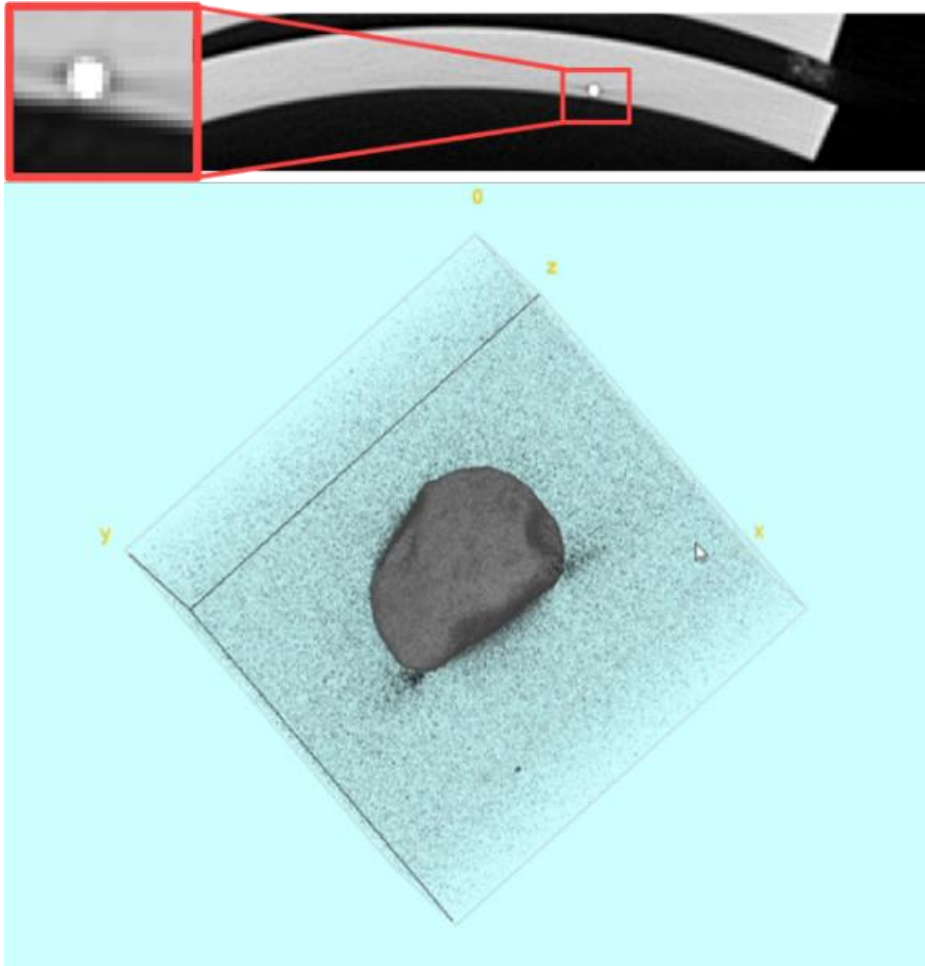
Figuur 5. Holten op verschillende locaties in proefstuk #04, gemeten met micro-CT, ongeveer 680 mm (links) en 945 mm (rechts) langs de scanrichting van de lage-resolutie meting. Bovenin is steeds weergegeven hoe de locatie eruitzag in de lage-resolutie CT-beelden.

4.2.2 Insluitsels in proefstuk #04

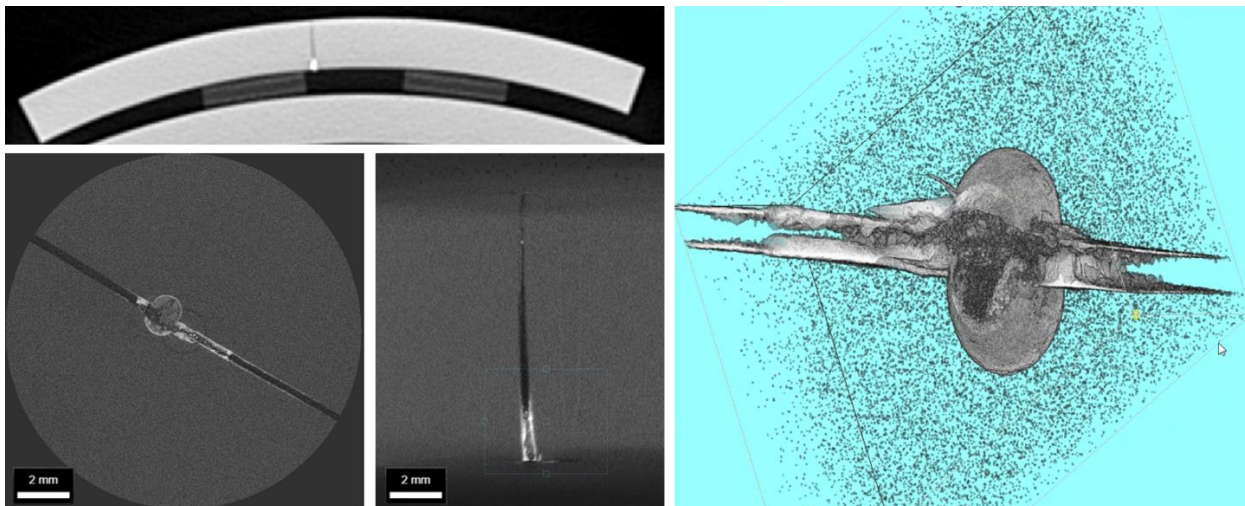
In proefstuk #04 zijn op verschillende locaties in de buiswand insluitels gedetecteerd. Met de micro-CT is eerst ingezoomd op een insluiting die in de lage-resolutie CT-beelden relatief groot leek ten opzichte van andere insluitels (Figuur 7). Met de *Volume Viewer* plugin van het pakket ImageJ zijn de micro-CT-beelden gecombineerd tot een ruimtelijke weergave van het deeltje. Het deeltje heeft een typische grijswaarde van ongeveer 50.000 (ten opzichte van een typische grijswaarde van het PVC van 10.000). De lengteschaal van het deeltje blijkt in de orde van 0.9 – 1.1 mm te zijn. Het deeltje leek zich in de lage-resolutie beelden te bevinden in een langwerpige holte in de omtrekriching van de buiswand. Ditzelfde is bij meer relatief grote deeltjes geobserveerd (bijv. in de scans van proefstuk #09, doorsnede 448). In de micro-CT-beelden is er echter geen overeenkomstig verschil in dichtheid te vinden in het PVC waarin het deeltje is ingebed. Er is geconcludeerd dat het in de lage-resolutie CT gaat om een verstrooiing van het beeld rond de relatief grote insluitels.

Vervolgens is ingezoomd op een insluiting die is aangetroffen in de binnenwand, midden in een korte lengtescheur (Figuur 7). Doorsneden gemaakt met de micro-CT suggereren dat er ooit een opvallend rond (ellipsoïde) deeltje in het PVC zat ingebed. De grijswaarde van dit deeltje is in de orde van 20.000 – 40.000, danig anders dan de hierboven beschreven insluiting dus. De lengteschaal is in de orde van 1.4 - 2.8 mm. De opvallend ronde vorm suggereert dat het hier gaat om een ander type insluiting dan het deeltje links in de figuur (wellicht een *fish eye*,

een slecht gegeleerd, over-gepolymeriseerd deeltje uit het PVC-granulaat). Het deeltje is inmiddels in tweeën gebroken en zit aan weerszijden van de scheur nog steeds ingebed in het PVC. Daarnaast lijkt een gedeelte van het deeltje verpulverd en uitgesmeerd te zijn over een deel van het oppervlak van de scheur. Al met al lijkt het hier daadwerkelijk te gaan om het deeltje waaromheen deze scheur ooit geïnitieerd is.



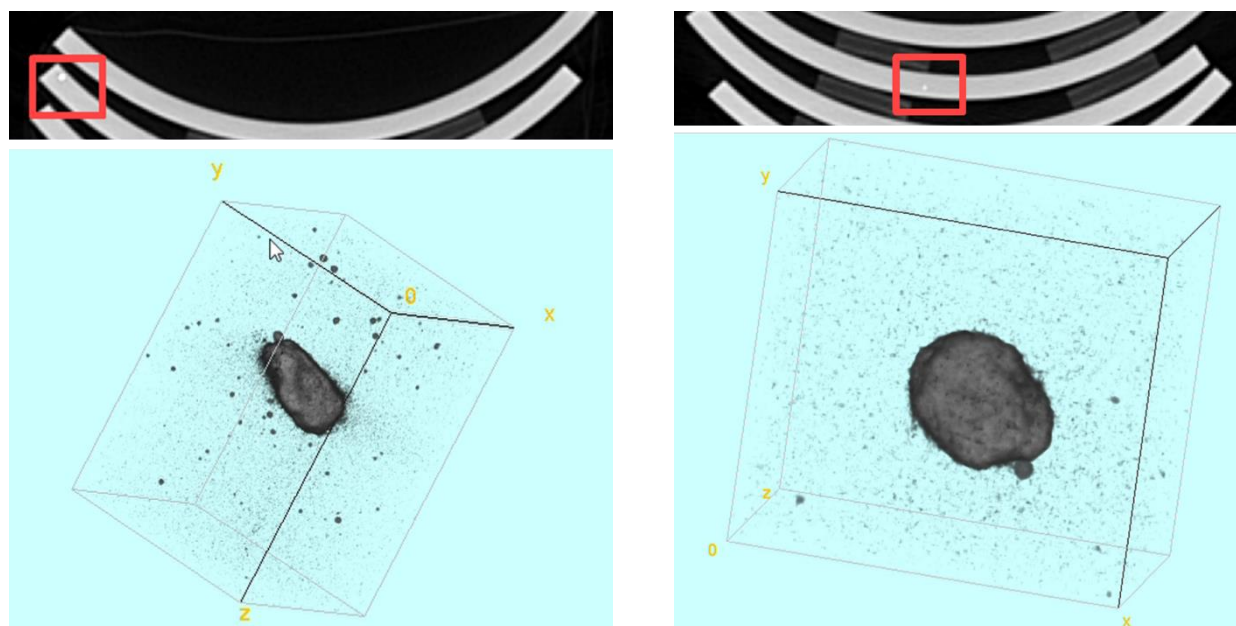
Figuur 6. Insluiting in proefstuk #04, gemeten met micro-CT, ongeveer 205 mm langs de scanrichting van de lage-resolutie meting. Bovenin is weergegeven hoe de locatie eruitzag in de lage-resolutie CT-beelden.



Figuur 7. Insluiting in proefstuk #04, gemeten met micro-CT, ongeveer 880 mm langs de scanrichting van de lage-resolutie meting. Linksboven is weergegeven hoe de locatie eruitzag in de lage-resolutie CT-beelden. Linksonder zijn dwarsdoorsneden van respectievelijk het bovenaanzicht en het zijaanzicht van de scheur weergegeven.

4.2.3 Insluitels in proefstuk #08

In proefstuk #08 zijn op verschillende locaties in de buiswand insluitels gedetecteerd. Met de micro-CT is ingezoomd op twee insluitels die zichtbaar waren in de lage-resolutie beelden (links en rechts in Figuur 8). Met de Volume Viewer plugin van het pakket ImageJ zijn de micro-CT beelden gecombineerd tot ruimtelijke weergaven van de deeltjes. Ten opzichte van de insluiting in Figuur 6 valt op dat deze deeltjes (met name het linke deeltje) omgeven worden door enkele veel kleinere deeltjes. De deeltjes zijn ook kleiner: 0.2 – 0.3 mm en 0.3 – 0.6 mm, respectievelijk. Dit suggereert dat het hier om verschillende typen insluitels gaat. Wel zijn de grijswaarden van de deeltjes vergelijkbaar, in de orde van 50.000.



Figuur 8. Insluitels op verschillende locaties in proefstuk #08, gemeten met micro-CT, ongeveer 205 mm (links) en 605 mm (rechts) langs de scanrichting van de lage-resolutie meting. Bovenin is steeds weergegeven hoe de locatie eruitzag in de lage-resolutie CT-beelden.

4.3 Discussie

De bovenstaande resultaten laten zien dat insluitels in het PVC met CT te detecteren zijn. Hoewel de deeltjes in dit onderzoek niet chemisch zijn geïdentificeerd, lijken er verschillende typen deeltjes te onderscheiden zijn (zie bijvoorbeeld de verschillende vormen van deeltjes in Figuur 4 g, i en k en de vergelijking tussen de deeltjes in Figuur 7 en Figuur 8). Het kunnen meten van dit soort insluitels in het PVC is potentieel een belangrijke ontwikkeling met veel impact voor het onderzoek naar de conditie van het PVC-leidingnet, omdat we weten dat deze insluitels dominant zijn in het scheurgroeiproces terwijl er tot nog toe geen mogelijkheden waren om deze deeltjes op te sporen (van Laarhoven, 2022). CT geeft, ten eerste, de mogelijkheid om gericht onderzoek te doen naar de aanwezigheid, eigenschappen en impact van deze insluitels. Ten tweede kan CT in de toekomst wellicht ook een methode voor exitbeoordelingen van leidingmateriaalkwaliteit bieden. Hiervoor is eerst onderzoek nodig om te kunnen herkennen wat de impact van verschillende gedetecteerde insluitels is. Ten derde kan CT ook ingezet worden om de ontwikkeling van andere meettechnieken voor leidinginspectie te ondersteunen en – minstens zo belangrijk – te valideren.

Eén aspect dat opvalt in het overzicht in Tabel 1 is het verschil in aantal insluitels dat per proefstuk is aangetroffen. Kijken we daarbij naar de aanlegjaren, dan zien we het volgende:

- Er zijn meer dan 40 deeltjes aangetroffen in de proefstukken uit 1965, 1967, 1970, 1972, 1973 en 1975;
- Er zijn 5 tot 20 deeltjes aangetroffen in de proefstukken uit 1966, 1972, 1973 en 1975;
- Er zijn minder dan 3 deeltjes aangetroffen in de proefstukken uit 1971, 1975, 2000, 2016 en 2022;

Deze resultaten suggereren dat de aanwezigheid van deeltjes in buizen geproduceerd tussen 1965 en 1975 erg variabel is terwijl de aanwezigheid van deeltjes in jongere buizen structureel lager is (maar niet 0). Vanuit dat perspectief zou CT dus wellicht handvatten bieden om de kwalitatief goede jaren-70 buizen te onderscheiden van de slechte.

In relatie tot het vorige punt zijn de resultaten met de lage resolutie CT van proefstukken #08, #09, #18 en #19 in het bijzonder opmerkelijk. Deze proefstukken hebben allen dezelfde diameter en hetzelfde aanlegjaar en ze komen allemaal uit dezelfde straat. Toch zijn er substantieel meer deeltjes gevonden in de scan van #08 (140) dan in die scans van de andere stukken (0, 13 en 15, respectievelijk). Dit zou kunnen duiden op een grote variabiliteit aan deeltjes binnen één batch van buisdelen (hoewel het in de praktijk niet terug te vinden was of er in een aanlegproject buizen van verschillende batches zijn gebruikt). Er moet wel opgemerkt worden dat er – om praktische experimentele redenen zoals de aanwezigheid van een reparatieklem – verschillende resoluties zijn gebruikt bij deze metingen, waarbij 140 deeltjes zijn gemeten bij de hoogste resolutie (0.39 mm per pixel), 13 en 15 deeltjes zijn gemeten bij de midden-resolutie (0.58 mm per pixel) en 0 deeltjes bij de laagste resolutie (0.78 mm per pixel). De micro-CT metingen aan deeltjes uit proefstuk #08 uit deze wijk (Figuur 8) suggereren dat de deeltjes in buizen uit deze straat lengteschalen hebben tussen de 0.2 en 0.6 mm. Het zou dus kunnen dat de lagere resoluties inderdaad leidden tot het missen van deeltjes in de proefstukken. Er zou gericht onderzoek moeten worden uitgevoerd om erachter te komen hoe representatief een meting is voor de buizen in de omgeving (bijvoorbeeld door een aantal buizen uit dezelfde omgeving nauwkeurig door te meten).

Een ander interessant aspect is de relatie tussen de aanwezigheid van deeltjes in een buisdeel en het storen van het buisdeel. Proefstukken #02, #05 en #06 zijn weliswaar uitgenomen bij een storing, maar het betrof hier problemen met de verbindingen. Proefstukken #09, #18, #19 en #20 hebben gestoord via scheurgroei (dit was ofwel de reden van uitname, ofwel te herkennen aan de aanwezigheid van een reparatieklem). Proefstukken #09, #18 en #19 komen daarbij uit de straat in het voorzieningsgebied van Brabant Water waar relatief veel insluitsels zijn gevonden (met de kanttekeningen van de voorgaande alinea). In Proefstuk #20 zijn echter geen insluitsels gevonden, terwijl dit het buisdeel betrof dat bij de daadwerkelijke reparatie is uitgenomen. Alle overige proefstukken zijn uitgenomen tijdens geplande vernieuwing en hebben zelf dus niet gestoord, terwijl daar in sommige gevallen wel een substantieel aantal insluitsels in is gevonden, zoals #01, #02, #08 en #15. In principe is het geen verrassing dat insluitsels niet altijd leiden tot een storing; storen zal altijd gaan om een samenspel van insluitel, sterkte-eigenschappen en belasting. De deeltjes in #08 waarop is ingezoomd (Figuur 8) zijn bijvoorbeeld klein genoeg om geen scheurgroei te veroorzaken bij reguliere belasting en sterkte-eigenschappen (zie bijv. van Laarhoven, 2020). Er is gericht onderzoek nodig om erachter te komen hoe representatief een CT-meting kan zijn voor het risico op storen; bijvoorbeeld via mechanische tests aan proefstukken met bevestigde aanwezigheid van insluitsels, via een statistische karakterisering van deeltjesconcentraties en -groottes, en via eindige-elementenmodellering om de locatie van een bepaald insluitel in een belast buisdeel te vertalen naar scheurgroei en falen.

5 Conclusies, bedrijfsparagraaf en aanbevelingen

5.1 Conclusies

- CT kan scheuren, holtes, erosie, geometrische afwijkingen en vervormingen van het leidingmateriaal PVC in beeld brengen.
- CT maakt het bovendien mogelijk om insluitsels in het materiaal te meten.
- In de verzameling proefstukken afkomstig uit buizen uit 1960 -1975 kwamen zowel proefstukken met veel (>40) insluitsels als proefstukken met weinig (<3) insluitsels voor. In de verzameling proefstukken afkomstig uit buizen uit 2000 – 2023 kwamen alleen proefstukken met weinig (<3) insluitsels voor (maar er waren wel degelijk insluitsels aanwezig).
- De resolutie van de hier gebruikte, medische CT-scanner (in de orde van 0.5 mm per pixel) zit dicht tegen de detectiegrens van insluitsels: te kleine insluitsels worden niet opgepikt en het beeld van insluitsels die groot genoeg zijn om te worden gedetecteerd kan vervormd zijn door artefacten, zodat de deeltjes niet gekarakteriseerd kunnen worden qua omvang.
- De resolutie van de hier gebruikte micro-CT (in de orde van 0.005 mm per pixel) is meer dan genoeg om de omvang en vorm van insluitsels gedetailleerd in beeld te brengen.
- Binnen de uit het veld uitgenomen proefstukken varieerde per proefstuk het aantal en het type (qua omvang en vorm) van de aanwezige insluitsels.

5.2 Bedrijfsparagraaf

[Deze alinea's komen van de hand van projectgroepleden die betrokken waren bij het voorliggende onderzoek. Namens de drinkwaterbedrijven reflecteren zij hier op de vraag: welk belang kan de uitkomst van het onderzoek dienen en welke vervolgstappen qua onderzoek en implementatie zouden daartoe moeten worden gezet?]

Brabant Water: De resultaten uit dit onderzoek maakt het voor de drinkwaterbedrijven mogelijk om via een destructieve, kostenefficiënte conditiemeting of validatiemeting, een van de oorzaken van (mogelijk) van falen van bestaande en nieuwe PVC leidingen vast te stellen; insluitsels in het materiaal. Dat vraagt nog wel verder vervolgonderzoek en/of innovatie. Ook de interpretatie voor een kans tot falen door de gemeten insluitsels vraagt verder onderzoek, maar daar zijn wel al ideeën voor zoals bij het materiaal AC is toegepast. Concluderend zal dit voor de drinkwaterbedrijven een belangrijk onderdeel worden in het beter vaststellen, begrijpen en voorspellen van faalgedrag van PVC leidingen.

WML: Dit onderzoek heeft zich in detail gericht op PVC-proefstukken die zijn verstrekt door meerdere drinkwaterbedrijven. Met behulp van CT-scans zijn kleine, met het oog onzichtbare afwijkingen gedetailleerd vastgelegd. Het onderzoek heeft vastgesteld dat er een aanzienlijke variëteit bestaat in het aantal en het type afwijkingen - met name insluitingen. De vervolgvraag richt zich op de mogelijkheid en wijze waarop deze insluitingen en andere afwijkingen kunnen worden vertaald naar faalgedrag en restlevensduur. Op de lange termijn zal nagedacht moeten worden over hoe deze bevindingen kunnen worden geïntegreerd in de tools die WML hanteert bij de vervangingsopgave.

Vitens: Een mooi en gedegen onderzoek. Het toepassen van de resultaten lijkt mij ook vanzelfsprekend als validatie voor toekomstige onderzoeken. Als dit uiteindelijk een stuk gereedschap oplevert waarmee je met een run door een pvc-buis echt de zwakke plekken kunt aantonen is dit perfect. Ik vraag mij wel af hoelang de ontwikkeling van een dergelijk stuk gereedschap gaat duren. We weten dat buisdelen geproduceerd in de jaren zeventig gevoelig zijn voor brosse breuken. Het is het aantal storingsen en het risico van de impact die bepalen waar en wanneer we gaan vervangen. Als beheerder zie ik meer in het verbeteren van de bestaande gereedschappen die de hoekverdraaiing en rondheid kunnen meten van buisdelen in koppelingen en daarbij de plaats markeren van waar deze knelpunten zitten. Hoekverdraaiing buiten de tolerantie en het ovaal zijn van een buisdeel veroorzaken extra spanning in het buismateriaal en dat geldt deels ook voor AC. Een gemeten ingesloten vuildeel zegt nog niets, mits je hier uitvoerig onderzoek naar doet en als het wat zegt dan hebben we nog steeds een relatief oude buis waarvan we weten dat verschillende leidingdelen storingsgevoelig zijn. Daarbij is er een relatie met de bedrijfsvoering van de pompstations die een negatief effect kunnen hebben op de levensduur van de leidingen. Mijn advies is doorgaan met het onderzoek zodat in de toekomst met mogelijk verbeterde sensoren de bestaande, in ontwikkeling zijnde gereedschappen, verbeterd kunnen worden.

5.3 Aanbevelingen

- Het is aan te bevelen om de inzet van CT door te ontwikkelen tot een nieuwe methode voor exitbeoordelingen.
 - Daartoe is gericht onderzoek nodig om erachter te komen hoe representatief een CT-meting kan zijn voor het risico op storen. Bijvoorbeeld via:
 - mechanische tests aan proefstukken met bevestigde aanwezigheid van insluitsels;
 - mechanische tests aan proefstukken met synthetisch aangebrachte scheuren die zijn bevestigd met CT;
 - statistische karakterisering van deeltjesconcentraties en -groottes in proefstukken;
 - eindige-elementenmodellering (FEM) om de locatie van een bepaald insluitel in een belast buisdeel te vertalen naar scheurgroei en falen.
 - Ook is gericht onderzoek nodig om erachter te komen hoe representatief een meting is voor de buizen in de omgeving (bijvoorbeeld door een aantal buizen uit dezelfde omgeving nauwkeurig door te meten).
- Vervolgens is het aan te bevelen om de doorontwikkelde exitbeoordelingen op basis van CT op te nemen in het programma van PVC-exitbeoordelingen dat op dit moment in het thematisch onderzoek wordt ontwikkeld.
- Het is aan te bevelen om met CT doorgemeten PVC-buisdelen te gaan gebruiken als referentieproefstukken bij de ontwikkeling en validatie van niet-destructieve meettechnieken waarmee de conditie van PVC gemeten zou kunnen worden tijdens in-line inspecties.

6 Referenties

Awaja, F., Zhang, S., Tripathi, M., Nikiforov A., en Pugno, N. (2016) Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: formation, detection, autonomic repair. *Progress in Materials Science*, vol. 83, pp. 536-576.

Chen, S.-H. , Jang, J.-H. , Chang, Y.-R., Kang, C.-H., Chen, H.-Y., Liu, K. F.-R. , Lee, F.-L., Hsueh Y.-S. en Youh, M.-J. (2022) An Automatic Foreign Matter Detection and Sorting System for PVC Powder. *Applied Sciences*, vol. 12, nr. 12, p. 6276.

Gould, S. J., Davis, P., Beale, D. J. en Marlow, D. R., (2013) Failure analysis of a PVC sewer pipeline by fractography and materials characterization. *Engineering Failure Analysis*, vol. 34, pp. 41-50.

Olufsen, S. N., Clausen, A. H., Breiby D. W. en Hopperstad, O. S. (2020) X-ray computed tomography investigation of dilation of mineral-filled PVC under monotonic loading. *Mechanics of Materials*, vol. 142, p. 103296.

Makris, K. F., Langeveld, J. en Clemens, F. H., (2022) A review on the durability of PVC sewer pipes: research vs. practice. *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 16, nr. 6, pp. 880-897.

Shang, Z., Li, T., Yang, S., Yan J. en Guo, H. (2020) Three-dimensional characterization of typical inclusions in steel by X-ray Micro-CT. *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, nr. 3, pp. 3686-3698.

van Laarhoven, K. A. (2020) Een model voor scheurgroei in PVCU buizen, geïmplementeerd in Comsim. BTO 2020.001, KWR, Nieuwegein.

van Laarhoven, K. A. (2022) Vingers achter PVC - overzicht van faalmechanismen en beheersmaatregelen rond PVC drinkwaterleidingsystemen. KWR 2022.041, KWR, Nieuwegein.

van Laarhoven, K. A., en Quintiliani, C. (2020) CT Scans of Asbestos Cement Pipes to Support the Development of Better Condition Assessments. *Environmental Sciences Proceedings*, vol. 2, nr. 11.

van Steen, J. E., Holzhaus, P. M. en van Laarhoven, K. A. (2021) Kennisopbouw AC met behulp van CT. BTO 2021.028, KWR, Nieuwegein.

Vilar, A., dos Santos, T., Machado, A., Oliveira, D., Azeredo, S. en Lopes, R. (2017) X-ray microtomography system for small and light samples using a flat panel detector,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 88, p. 105112.