

A network diagram consisting of various sized light blue circles connected by thin white lines, set against a solid blue background. The circles vary in size, with some being significantly larger than others, and they are interconnected in a complex, non-linear fashion.

**Bedrijfstakonderzoek**  
BTO 2021.028 | December 2021

## **Kennisopbouw AC met behulp van CT**



# Rapport

## Kennisopbouw AC met behulp van CT

BTO 2021.028 | December 2021

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

### Opdrachtnummer

402045-213

### Projectmanager

ir. P.M. (Petra) Holzhaus

### Opdrachtgever

BTO - Bedrijfsonderzoek

### Auteur(s)

ir. J.E. (Jip) van Steen, ir. P.M. (Petra) Holzhaus, dr.ir. K.A. (Karel) Laarhoven

### Kwaliteitsborger(s)

dr. P. (Peter) van Thienen

### Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.

Een jaar na publicatie is het openbaar.

### Keywords

uitloging, Computed Tomography, CT, asbestcement, distributie, leidingconditie, conditiebepaling, pulse echo ultrasound

Jaar van publicatie  
2021

### Meer informatie

Karel van Laarhoven  
T +31 (0)30 60 69 697  
E karel.van.laarhoven@kwrwater.nl

PO Box 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

**KWR**

December 2021 ©

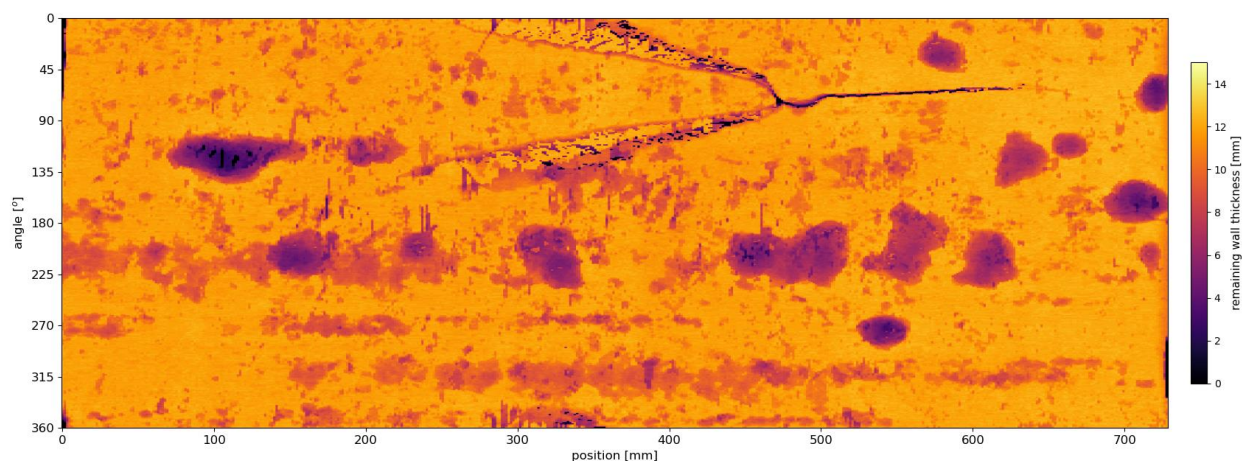
Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen,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

# Managementsamenvatting

## CT-scans maken conditiebepaling van AC op vele vlakken makkelijker

**Auteur(s)** ir. J.E. (Jip) van Steen, ir. P.M. (Petra) Holzhaus, dr.ir. K.A. (Karel) Laarhoven .

In voorgaand BTO onderzoek is de aantasting van asbestcementbuizen met behulp van CT-scans vastgesteld met ongekend detail. In dit onderzoek zijn de scans ten eerste gebruikt om een handzamere meetmethode te valideren, zodat waterbedrijven weten wat ze mogen verwachten bij het gebruik van deze methode in het veld. Daarnaast zijn AC materiaalwaarden die volgden uit ouder BTO onderzoek aangescherpt met behulp van de CT-data. Deze materiaalwaarden kunnen in de toekomst gebruikt worden als betere invoer voor modellen waarmee de conditie van het net kan worden ingeschat. Ook is nader uitgewerkt hoe waterbedrijven CT (kosten)effectief kunnen toepassen voor nauwkeurigere exitbeoordelingen.



*Weergave van de aantasting van het oppervlak van een AC buis zoals gemeten met CT. Donkere plekken zijn de uitgelopen delen, de nagenoeg zwarte streep is een scheur in het materiaal.*

### **Belang: Inzicht in de conditie van het AC leidingnet**

Het drinkwatertransport- en distributienet bestaat nog voor 25% uit asbestcement (AC). Aangezien dit soort leidingen relatief vaak stoort, streven drinkwaterbedrijven ernaar deze de komende decennia te vervangen. Om te bepalen welke leidingen een hogere prioriteit hebben om te vervangen, is het van belang om kennis te vergaren over de degradatie van deze leidingen en daarnaast om de invloed van degradatie op de sterkte van de leidingen te bepalen.

Met CT-scans kon in het verleden een gedetailleerd beeld worden gegeven van de degradatie van AC.

Ook werd toen aangetoond dat beschikbare, handzamere in-line technieken op dat moment worstelden met het correct vaststellen van de mate van degradatie.

### **Aanpak: meer leren uit nauwkeurige CT-scans**

In dit rapport zijn de CT-scans op verschillende manieren gebruikt om het inzicht in aantasting te helpen vergroten:

1. Een doorontwikkelde in-line techniek is gevalideerd met CT om vast te stellen of deze techniek de drinkwaterbedrijven in de

toekomst kan helpen om aantasting correct te meten in het veld.

2. Materiaalwaarden van AC die mede zijn gebaseerd op foutieve in-line metingen uit het verleden zijn gecorrigeerd op basis van CT om te dienen als betere invoer voor conditiemodellen van het leidingnet.
3. Door de aantastingspatronen in de CT-scans te combineren met de uitkomsten van bezwijkproeven is de invloed verkend van inhomogene aantasting op het ontstaan van de scheur tijdens de sterkteproeven.
4. De potentie van CT voor bredere toepassing door de waterbedrijven voor exitbeoordelingen van AC wordt uitgewerkt.

#### Resultaten:

1. De nieuwe in-line techniek presteert beter dan de vorige versie die met CT gevalideerd werd. Toch is het nog steeds zo dat de meetmethode nog niet robuust genoeg is om blind op te vertrouwen. Met name het identificeren van lokale verschillen in uitloging blijft een uitdaging.
2. De nieuwe tangentiële elasticiteitsmodulus is hoger dan gemeten in het vorige onderzoek, maar nog steeds lager dan de waarde vermeld in de catalogus. De nieuwe faalspanning is hoger dan gemeten in het vorige onderzoek, maar de gevonden waarden zijn veel beter in lijn met de waarden in de catalogus.
3. Er is geen duidelijke invloed van inhomogene aantasting op het ontstaan van de scheur tijdens de sterkteproeven gevonden.
4. Met enige zorg voor een veilige logistiek is het haalbaar om exitbeoordelingen met CT op te zetten tegen relatief lage kosten.

#### Toepassing: advies voor toekomstige toestandsbepaling en exitbeoordelingen

De gevalideerde in-line techniek is één van de meest veelbelovende van dit moment, maar essentiële dataverwerkingsstappen zijn nog niet robuust genoeg en zijn daarnaast afhankelijk van bedrijfsdata die de waterbedrijven zelf maar beperkt beschikbaar hebben om de uitkomsten blindelings te vertrouwen. Het wordt aanbevolen om de techniek te gebruiken maar ook om kritisch te blijven op de resultaten en om doorontwikkeling te blijven stimuleren.

CT blijkt een valide optie te bieden voor nauwkeurige exitbeoordelingen van AC. Het wordt aanbevolen om dit op pilotschaal uit te proberen.

#### Het Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Kennisopbouw AC met behulp van CT* (BTO-2021.028).



# Inhoud

<b>Rapport</b>	<b>2</b>
<b><i>Managementsamenvatting</i></b>	<b>3</b>
<b>Inhoud</b>	<b>6</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>8</b>
1.1 Aanleiding en doel	8
1.2 Aanpak en leeswijzer	9
<b>2 Validatie ultrasoon-techniek met CT-scans</b>	<b>10</b>
2.1 Inleiding	10
2.2 Aanpak	10
2.2.1 Proefstukken	10
2.2.2 CT-scans	10
2.2.3 PipeScanner	10
2.2.4 Vergelijking en validatie	10
2.3 Resultaten	12
2.4 Discussie en conclusies	15
<b>3 Herberekening sterkteproeven met CT</b>	<b>17</b>
3.1 Inleiding	17
3.2 Aanpak	17
3.2.1 Identificeren minimum wanddikte op de scheur	17
3.2.2 Berekenen nieuwe materiaalwaarden	18
3.3 Resultaten en discussie	18
<b>4 Invloed van heterogene aantasting op bezwijken</b>	<b>20</b>
4.1 Inleiding	20
4.2 Aanpak	20
4.3 Resultaten en discussie	20
<b>5 Ontwikkeling exitbeoordeling op basis van CT</b>	<b>23</b>
5.1 Inleiding	23
5.2 Inventarisatie beschikbaarheid en kosten van CT-metingen	23
5.3 Standaard analyse	24
5.4 Beschrijving protocol uitnemen AC buizen voor CT-meting	24
5.5 Discussie en aanbeveling	25
<b>6 Verkenning potentieel CT voor PVC</b>	<b>26</b>
6.1 Inleiding	26

6.2	Literatuuronderzoek	26
6.3	Raadplegen experts universiteit	26
6.4	Conclusie	26
<b>7</b>	<b>Conclusies</b>	<b>27</b>
7.1	Conclusies	27
7.2	Aanbevelingen voor implementatie van de resultaten	27
7.3	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	28
<b>I</b>	<b>Referenties</b>	<b>30</b>
<b>II</b>	<b>US-validatie met CT-resultaten</b>	<b>31</b>
<b>III</b>	<b>Wanddikte profielen op de buis en scheur</b>	<b>45</b>



# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding en doel

Het drinkwatertransport- en distributienet bestaat nog voor 25% uit asbestcement (AC). Aangezien dit soort leidingen relatief vaak storen, streven drinkwaterbedrijven ernaar deze de komende decennia te vervangen. Om te bepalen welke leidingen een hogere prioriteit hebben om te vervangen, is het van belang om kennis te vergaren over de degradatie van deze leidingen en daarnaast om de invloed van degradatie op de sterkte van de leidingen te bepalen.

In recent BTO themaonderzoek (Beuken en van Laarhoven 2019) zijn uitgenomen AC buizen onderworpen aan bezwijkproeven om de eigenschappen van het (verouderde) materiaal te bepalen. In parallel adviesonderzoek zijn toen CT-scans gemaakt van de buizen, vóór en ná bezwijken. In daaropvolgend onderzoek zijn deze CT-scans nader geanalyseerd en vergeleken met metingen aan dezelfde buizen met andere niet-destructieve technieken (van Laarhoven en van Summeren 2019; van Laarhoven 2019). Ten eerste bleek dat de CT-scans een gedetailleerd beeld te geven van de degradatie van AC. Ten tweede bleek dat de huidige niet-destructieve technieken op dit moment worstelen met het correct vaststellen van de mate van degradatie op een robuuste manier.

In dit bedrijfsonderzoek bouwen we voort op de bovengenoemde onderzoeken met de volgende vijf thema's, die elk in een eigen hoofdstuk in dit rapport worden behandeld:

- 1 Acquaint B.V. heeft zijn ultrasoonsensor doorontwikkeld met als doel een inspectietechniek te realiseren die op robuuste wijze de correcte restwanddikte van AC buizen kan bepalen. Acquaint heeft met de doorontwikkelde techniek metingen verricht op de AC buizen waarvan de CT-scans beschikbaar zijn. In dit project werd een deelverzameling van de CT-scans beschikbaar gesteld aan Acquaint B.V. om de doorontwikkeling te ondersteunen. Vervolgens werd op basis van een andere deelverzameling van de scans de doorontwikkelde techniek onafhankelijk door KWR gevalideerd.
- 2 Uit het eerder sterkteonderzoek volgden de bezwijkspanning en elasticiteitsmodulus van AC, die belangrijke invoer zijn voor het voorspellen van leidingtoestand en -conditie. De interpretatie van de sterkteproeven werd echter gebaseerd op aantastingsprofielen bepaald met radarmetingen, waarvan duidelijk is geworden dat deze niet betrouwbaar zijn. Met behulp van de CT-scans kan de werkelijke minimum wanddikte op het breukvlak bepaald worden, wat vervolgens kan worden gebruikt voor een herinterpretatie van de resultaten van de sterkteproeven (Beuken en van Laarhoven 2019; van Laarhoven 2019). Dit resulteert in nauwkeurigere materiaalwaarden die gebruikt kunnen worden bij conditiebepaling.
- 3 De huidige toestandsmodellen voor AC gaan uit van homogene aantasting. Het belang van een lokaal zwaardere aantasting bij falen blijft onduidelijk. Een eerste indicatie van het belang van inhomogene aantasting kan worden verkregen door de CT-scans van een buis te vergelijken van voor en na het bezwijken tijdens de sterkteproeven. Het degradatieprofiel van het vlak waar de breuk is ontstaan kan herleid worden uit de CT-scans en worden vergeleken met de aantasting van de rest van de buis. Dit resulteert in een beter beeld van de eisen die de bedrijven moeten stellen aan het detail van de wanddiktemetingen die zij gebruiken voor conditiebepaling.
- 4 De aantasting van AC is moeilijker vast te stellen door in-line inspectie dan gedacht. Het is daarom voor de drinkwaterbedrijven interessant om CT te overwegen als gedetailleerde exitbeoordeling (ook met oog op toekomstige validatie van andere technieken). In dit project is een protocol voor exitbeoordeling van AC met CT opgesteld en beoordeeld op haalbaarheid. Hiermee krijgen de drinkwaterbedrijven mogelijk toegang tot een nieuwe, nauwkeurige methode voor conditiebepaling.

- 5 Nu is gebleken dat CT-scans waardevolle inzichten opleveren voor het leidingmateriaal AC, volgt de vraag of deze techniek ook waardevolle informatie kan genereren voor PVC leidingen. Kunnen CT-scans gebruikt worden om beginnende haarscheuren of insluitingen van vreemd materiaal in de PVC buiswand te meten (Awaja e.a. 2016)? Er zijn nog geen inspectietechnieken voor waterleidingen beschikbaar die deze belangrijke aspecten van de degradatie van PVC meten. CT zou dan de mogelijkheid bieden om deze aspecten te onderzoeken, maar zou vooral ook handvatten kunnen bieden voor de ontwikkeling van inspectietechnieken, als referentiemateriaal aan de hand waarvan ontwikkeling gestuurd kan worden. In dit project is het potentieel van CT hiervoor onderzocht.

## 1.2 Aanpak en leeswijzer

De aanpak van dit onderzoek volgt de volgorde van bovenstaande thema's. Allereerst werd de ultrasoon techniek gevalideerd met behulp van de CT-scans, aan de hand van de opgezette methodiek in vorige onderzoeken. Vervolgens werd er softwarematig de minimum wanddikte op de scheur bepaald, waarmee de sterkteproeven opnieuw konden worden geïnterpreteerd voor gecorrigeerde materiaalwaarden. Daarna is er een algoritme geschreven dat de distributie van wanddiktes op zowel de scheur als over de gehele buis vergelijkt, om zo te bepalen of het scheuren van de buizen inderdaad is beïnvloed door lokale aantasting. Hierna zijn de beschikbaarheid en kosten van CT-metingen van AC buizen geïnventariseerd. Tot slot is er geïnventariseerd of CT-scans voor PVC leidingen ook waardevolle informatie kan opleveren.

In hoofdstuk 2 wordt toegelicht hoe de doorontwikkelde ultrasoon sensor techniek onafhankelijk gevalideerd is aan de hand van CT-scans. In hoofdstuk 3 wordt beschreven hoe de minimum wanddikte op het breukvlak met de CT-scans bepaald is en hoe deze gebruikt is voor herinterpretatie van de resultaten van de sterkteproeven. In hoofdstuk 4 wordt beschreven hoe het degradatieprofiel van het breukvlak vergeleken is met dat van de rest van de buis, waarmee het belang van inhomogene degradatie van AC onderzocht wordt. In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de overweging om CT-scans te gebruiken als exitbeoordeling van AC. In hoofdstuk 6 wordt, gezien de relevante informatie die CT-scans opleveren van AC, de vraag behandeld of deze techniek ook toepasbaar is voor PVC. In hoofdstuk 7 worden de conclusies en aanbevelingen van deze studie samengevat.

## 2 Validatie ultrasoon-techniek met CT-scans

### 2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de ultrasoon-techniek (US) vergeleken met de resultaten van de CT-scans. De US-techniek is gebaseerd op het in-line inspecteren van een leiding door middel van ultrasoon (zeer hoog frequentie) geluid. De Hierbij wordt CT als grondwaarheid beschouwt gezien de bewezen hoge nauwkeurigheid die deze techniek heeft, zoals uitgebreid besproken in (van Laarhoven en van Summeren 2019).

### 2.2 Aanpak

#### 2.2.1 Proefstukken

De resultaten van de CT-scans over de 32 asbestcement buisdelen is besproken in (van Laarhoven 2019). Op deze buizen zijn ook sterkteproeven gedaan (Beuken en van Laarhoven 2019) waardoor een deel van de buizen zijn gescheurd. De buizen die hierdoor scheurden werden daarna opnieuw gescand met CT.

Een deelverzameling van 7 CT-scans is beschikbaar gesteld aan Acquaint B.V. om de doorontwikkeling van de US-sensor te ondersteunen. Vervolgens is er op basis van een andere deelverzameling van 7 CT-scans de doorontwikkelde techniek onafhankelijk door KWR gevalideerd. Op die manier krijgen de drinkwaterbedrijven toegang tot een betrouwbaardere in-line inspectietechniek voor de degradatie van AC buizen.

#### 2.2.2 CT-scans

Er werd gebruik gemaakt van een Siemens Somatom Definition medische scanner. Voor verdere specificaties en instellingen van de CT-scanner wordt gerefereerd aan (van Laarhoven 2019). De CT-scanner scant de buis voor elke 1.5mm lengte van de buis, met een resolutie van 0.29mm per pixel. De ruwe data van de CT-scan is beschikbaar als een collectie van afbeeldingen, waarin elke afbeelding de verschillen in radiodichtheid – die in het specifieke geval van AC drinkwaterbuizen één op één overeenkomen met verschillen in materiaalcompositie (van Laarhoven en van Summeren 2019) – weergeeft in een dwarsdoorsnede van de buis op de desbetreffende locatie in de lengterichting van de buis. Een beeldverwerkingsalgoritme is gemaakt om het aangetaste materiaal van het onaangetaste materiaal te onderscheiden, op basis van de verschillende tinten grijs in de CT-afbeeldingen. Voor een uitgebreide uitleg van deze methode wordt verwezen naar (van Laarhoven en van Summeren 2019).

#### 2.2.3 PipeScanner

Uitgebreide specificaties van de sensor van Acquaint zijn niet openbaar. Hoe de ultrasone metingen uitgevoerd zijn, staat uitgebreid beschreven in (van Laarhoven 2019). De metingen zijn uitgevoerd met een handscanner met daarin de ultrasoonsensor die in zijn geheel de PipeScanner wordt genoemd. Hierbij wordt de PipeScanner over de buitenzijde van de buis heen bewogen. Acquaint gebruikt op maat gemaakte software voor signaalverwerking om uit deze ruwe data de effectieve wanddikte te bepalen.

#### 2.2.4 Vergelijking en validatie

Om de US-data met de CT scan te vergelijken is het belangrijk om de beginpositie en richting van de PipeScanner te weten, zodat het juiste CT omtrekprofiel uit de CT scan gehaald kan worden. Om de CT-scans goed te kunnen vergelijken met de US-scans is er veel zorg besteed aan het uitlijnen van beide metingen. Er zijn foto's gemaakt van de buis waarop de scheur te zien is, en foto's van de plaatsing van de PipeScanner op de buis (zie Figuur 1 als voorbeeld). Uit deze foto's kon het volgende afgeleid worden: 1) de afstand van de US-scan t.o.v. het einde van de buis 2) de bandbreedte in lengterichting waarbinnen de PipeScanner is geplaatst, 3) de omtrekriching waarin PipeScanner werd bewogen. De zijkant van de buis is (ter voorbereiding van de sterkteproeven, vóór CT-scans en

US-scans) recht afgezaagd en is beschouwd als betrouwbaar referentiepunt. Om enige meetonzekerheid mee te nemen is bij de CT-scan rekening gehouden met een bandbreedte van 1 cm. Dit betekent dat alle CT profielen in deze bandbreedte van 1cm zijn meegenomen om tot een interval te komen waarbinnen alle CT profielen liggen (te zien in Figuur 3, het rode interval).

Om de CT-scan uit te lijnen met de US-data is er ook nauwkeurig gekeken naar de scheur op de buis. Tijdens de US-metingen zijn de buizen zodanig gedraaid dat de locatie van de scheur zich aan de bovenzijde bevond. Aan de hand van de foto's en de vorm van de scheur konden het begin, het einde en de rotatie van de buis bepaald worden.



*Figuur 1: Links: foto van de PipeScanner op de buis waarop de afstand t.o.v. het einde van de buis, de bandbreedte van de PipeScanner en de omtrek richting van de PipeScanner te zien is. Rechts: foto van de gehele buis waarop de scheur te zien is.*

Het protocol dat is opgesteld om de US-sensor te valideren is uitvoerig beschreven in (van Laarhoven 2019). De originele wanddikte van de buis werd meegenomen om de ruwe US-meetdata te kunnen interpreteren. Bij exitbeoordelingen meet Acquaint deze met een schuifmaat op enkele locaties op de wand. Om de US-techniek te valideren waarbij minimale voorkennis beschikbaar is zijn er 9 buizen beschikbaar gesteld aan Acquaint waarvan de originele wanddikte data niet beschikbaar is gesteld. Hiervan zijn er 6 door Acquaint gemeten, zie Tabel 1. De US-wanddikte meetdata wordt dan vergeleken met de CT-wanddikte data, waarbij dezelfde methodiek gevolgd wordt als beschreven in (van Laarhoven 2019).

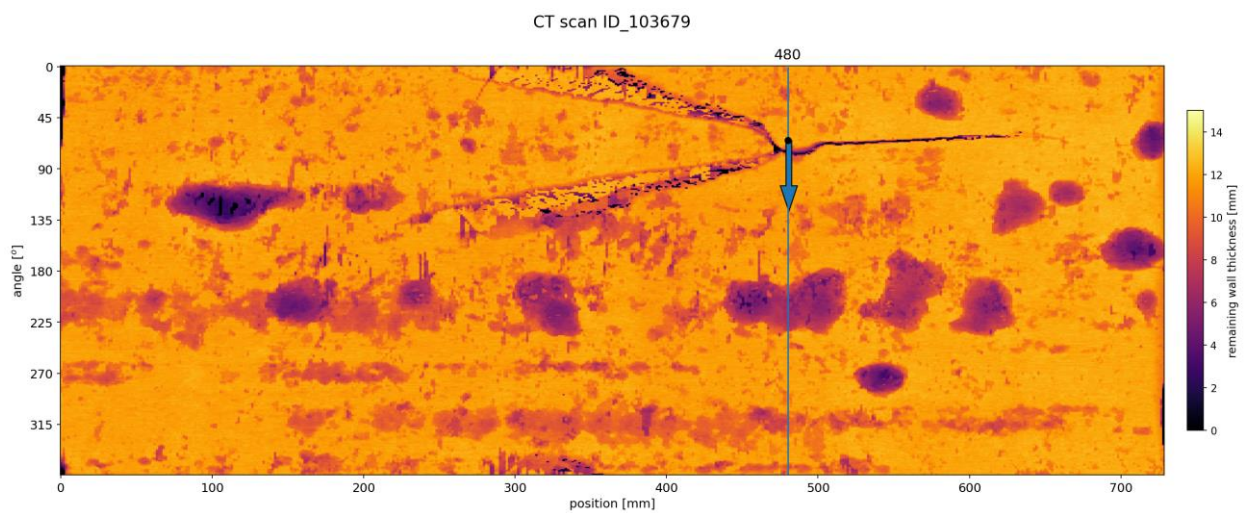
*Tabel 1: Overzichtstabel van de buizen die gescand zijn met de US-sensor, en welke CT-scans vooraf gedeeld zijn met Acquaint.*

Buis ID	CT-scan gedeeld met Acquaint	# metingen gedaan door Acquaint
P10915_new	Nee	1
Blerick2	Ja	1
103679	Ja	1
168218	Ja	3
10427-01	Ja	3
161290	Ja	3
Blerick-4	Nee	3
ONB-03	Ja	4
D10915-1new	Nee	4
DUN004	Nee	5
D09586-1	Nee	2

177340	Nee	3
D09930	Nee	2
0026	Nee	2
177598	Ja	0
192568	Ja	0
BLERICK1	Ja	0
BLERICK3	Nee	0

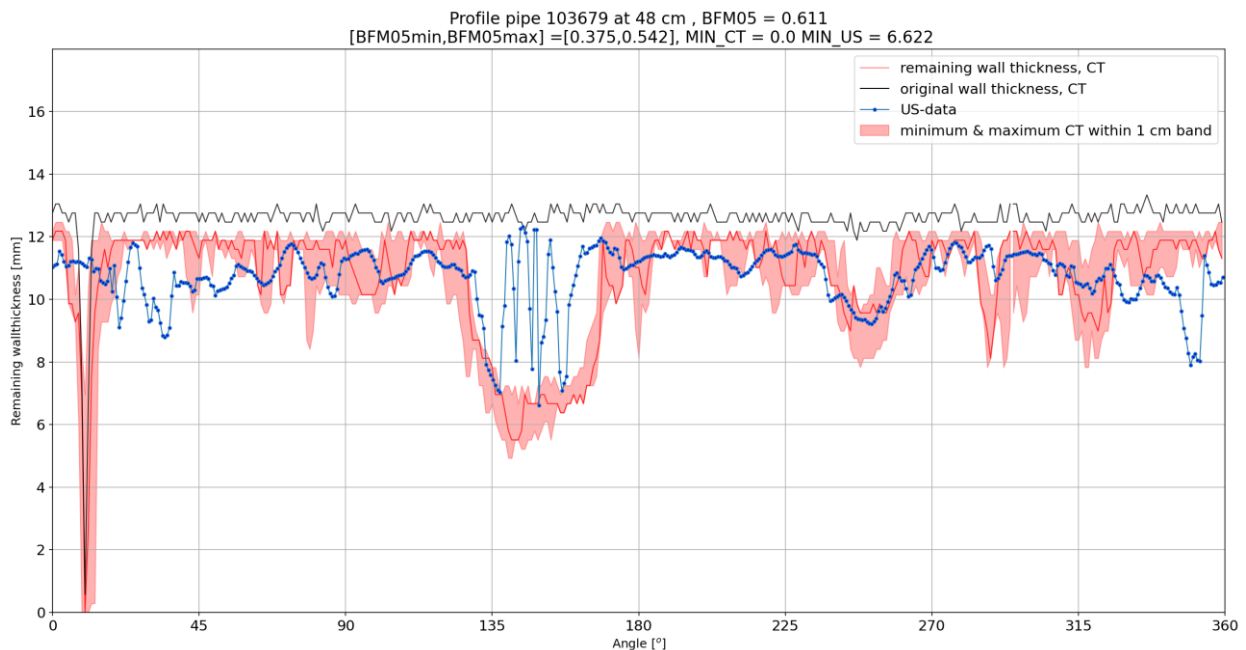
## 2.3 Resultaten

Figuren waarin US-en CT-uitkomsten worden vergeleken zijn voor alle buizen in Tabel 1 weergegeven in Appendix II. Als voorbeeld wordt hier een buis (ID 103679) uitgelicht. Een representatie als hoogtekaart van de CT-scan van de buis is te zien in Figuur 2. De vergelijking met de US-scan is weergegeven in Figuur 3. De CT-scan is vooraf gedeeld met Acquaint.



Figuur 2: CT-scan buis ID 103679. De US-scan (groene lijn) is genomen op 48cm (480mm) vanaf de zijkant van de buis. Het zwarte punt en de blauwe pijl op de lijn geven de startpositie en richting aan van het CT profiel (zie figuur 3), dit ter uitlijning van de US-data.





*Figuur 3: US-data (blauw) vergeleken met CT-data (rood), voor buis ID 103679 op 48 cm van het einde van de buis. De bandbreedte in rood geeft het minimum en het maximum van 1cm bandbreedte. De originele, onaangetaste wanddikte is weergegeven in zwart. De BFM05, BFM05min en BFM05max waarden zijn aangegeven in de titel.*

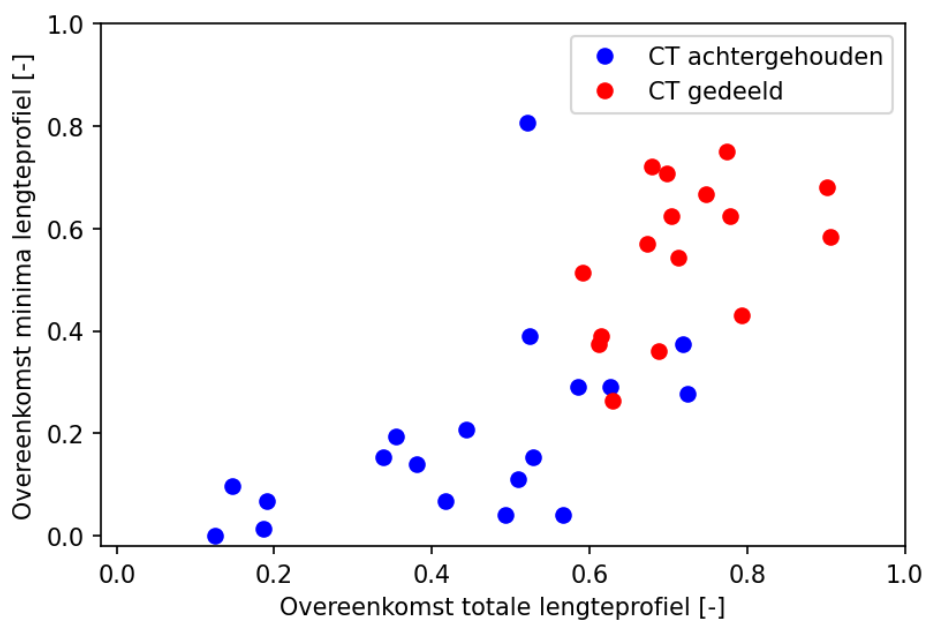
Om te kunnen kwantificeren hoe goed de US-data overeenkomt met de CT-data zijn er hieronder drie termen gedefinieerd. Bij het uitrekenen van deze termen wordt een US-datapunt steeds vergeleken met het CT-datapunt op dezelfde hoek dat binnen de bandbreedte in de lengterichting het meest overeenkomt met US-qua wanddikte. Deze gebruikte benadering wordt beschouwd als een benadering die vergevingsgezind is richting de ultrasoonstechniek; een nauwkeurigere benadering zou zijn om binnen de bandbreedte het profiel te zoeken dat de kleinste gesommeerde fout heeft.

- BFM05: Binnen Fout Marge 5% staat voor de fractie US-datapunten die minder dan 5% van de originele wanddikte afwijkt ten opzichte van de CT-data. Dit is een maat voor hoe goed de US-sensor het totale lengteprofiel in kaart brengt. Uit de data weergegeven in Figuur 3 volgt dat BFM05=0.632. Dit betekent dat 63% van de US-data minder dan 0.65 mm (5% van 13 mm) afwijkt van de CT-data.
- BFM05min: Een selectie is gemaakt van de 20% laagste CT-waarden en de bijbehorende US-data. Van deze selectie is bepaald hoe groot de fractie van US-data is die minder dan 5% van de originele wanddikte afwijkt ten opzichte van de CT-data. Dit is een maat hoe goed de US-sensor minima in kaart brengt. Uit de data weergegeven in Figuur 3 volgt dat BFM05min=0.292. Dit betekent dat 29% van de US-data minder dan 0.65 mm (5% van 13 mm) afwijkt van de CT-data.
- BFM05max: Een selectie is gemaakt van 20% hoogste CT-waarden en de bijbehorende US-data. Van deze selectie is bepaald hoe groot de fractie van US-data is die minder dan 5% van de originele wanddikte afwijkt van de CT-data. Dit is een maat hoe goed de US-sensor maxima in kaart brengt. Uit de data weergegeven in Figuur 3 volgt dat BFM05max=0.597. Dit betekent dat 60% van de US-data minder dan 0.65 mm (5% van 13 mm) afwijkt van de CT-data.
- Het profiel op de plek van de scheur wordt niet meegenomen in de bepaling van de BMF waarden.

In Figuur 3 valt te zien dat BFM05min lager is dan BFM05max. Dit betekent dat in dit geval de US-scan de maxima van de CT -scan beter in kaart brengt dan de minima. De resulterende vergelijkingswaarden (BFM05, BFM05min en BFM05max) zijn voor alle vergeleken scans weergegeven in Tabel 2. De BFM05 waarden uit Tabel 2 zijn uitgezet tegen de BFM05min waarden in Figuur 4.

Tabel 2: Vergelijkingen van alle scans in termen van BFM05, BFM05min en BFM05max. De figuren van alle vergelijkingen zijn weergegeven in Appendix II. Meerdere getallen in een cel betekenen meerdere profielen van de betreffende buis. De waarden met \* zijn niet meegenomen in Figuur 4, omdat de buis in deze delen te zwaar was aangetast om betrouwbare CT-resultaten te verkrijgen.

Buis ID	CT-scan gedeeld	BFM05	BFM05min	BFM05max
P10915_new	Nee	0.446	0.319	0.667
Blerick2 [ongebroken]	Ja	0.704	0.704	0.788
103679	Ja	0.632	0.292	0.597
168218	Ja	0.649, 0.539, 0.683	0.611 , 0.431, 0.708	0.569, 0.486, 0.583
10427-01	Ja	0.906, 0.901, 0.793	0.583, 0.681, 0.431	1.0, 0.903, 0.958
161290	Ja	0.629, 0.688, 0.712	0.264, 0.361, 0.542	0.667, 0.75, 0.708
Blerick-4 [ongebroken]	Nee	0.774, 0.673, 0.591	0.774, 0.673, 0.591	0.819, 0.917, 0.694
ONB-03	Ja	0.032*, 0.0*, 0.713, 0.655	0.083*, 0.028*, 0.667, 0.361	0.125*, 0.028*, 0.5, 0.542
D10915-1new	Nee	0.338, 0.524, 0.521, 0.586	0.153, 0.389, 0.806, 0.292	0.25, 0.417, 0.292, 0.556
DUN004	Nee	0.762, 0.45, 0.392, 0.56, 0.505	0.417, 0.028, 0.014, 0.25, 0.056	0.944, 0.806, 0.792, 0.819, 0.764
D09586-1	Nee	0.037, 0.082	0.0, 0.0	0.097, 0.306
177340	Nee	0.713, 0.67, 0.473	0.5, 0.319, 0.056	0.639, 0.875, 0.944
D09930	Nee	0.332, 0.632	0.125, 0.069	0.542, 0.889
0026	Nee	0.289, 0.272	0.069, 0.014	0.347, 0.222



Figuur 4: BFM05 (horizontale as) uitgezet tegen BFM05min (verticale as), voor alle US-scans vergeleken met de bijbehorende CT-scan profiel. De vergelijkingen waarvan de CT-scan gedeeld is met Acquaint is getoond in rood, de vergelijkingen waarvan deze niet is gedeeld is getoond in blauw.

## 2.4 Discussie en conclusies

De BMF-waarden zijn geconstrueerd om de kwaliteit van een vergelijking in één enkel getal te vangen. Door die samenvatting gaat ook informatie verloren. Er zijn andere figuren en parameters te construeren die een vergelijking met meer detail kunnen beschrijven (bijvoorbeeld een R2 waarde of een Mean Percentage Error), maar voor het doel om alle vergelijkingen in één figuur (Figuur 4) samen te brengen volstaan de BMF-waarden. Twee conclusies kunnen getrokken worden uit Figuur 4. Ten eerste is de BMF05 typisch hoger dan BMF05min. Dit betekent dat de US-sensor de gemiddelde resterende wanddikte over het totale lengteprofiel beter in kaart brengt dan de minima op de AC buis.

Ten tweede scoren de vergelijkingen waarvan de de CT-scans gedeeld zijn hoger dan de vergelijkingen waarvan de CT-scans niet gedeeld zijn. Zowel de resterende wanddikte van het totale lengteprofiel als de minima worden beter weergegeven bij de buizen waarvan CT-data gedeeld was.

Uit de evaluatie met Acquaint blijkt dat zij de gedeelde scans als houvast gebruikt hebben bij de (deels) handmatige dataverwerking van de bijbehorende US-scans. Het delen van de scans heeft geen invloed gehad op het meetprincipe of op de fysieke uitvoering van de metingen met de PipeScanner. Het verschil in de resultaten moet dus gezocht worden in de robuustheid van het dataverwerkingsalgoritme van Acquaint. Acquaint geeft het volgende aan over factoren die de verwerkbaarheid van het signaal beïnvloeden:

*In de praktijk wordt de PipeScanner gebruikt wanneer de AC-leidingen in bedrijf zijn, dus drinkwater erdoor wordt vervoerd. Deze laatste voorwaarde is van groot belang voor de kwaliteit van de ultrasonische meettechniek. Wanneer AC-materiaal verzadigd is met water, is de demping van akoestische golven aanzienlijk lager dan uitgedroogde leidingen. Bijvoorbeeld leidingen die al jaren niet meer in gebruik zijn, zal het meetresultaat van de PipeScanner moeilijker interpreteerbaar zijn. Dit verhoogt de complexiteit van de huidige dataverwerking. Bovendien worden bij hoge degradatieniveaus en in verzadigde AC-leidingen de huidige dataverwerking belemmerd.*

*Bij grote degradaties is het moeilijker om de minima te rapporteren omdat het signaal sterk gedempt is. Dit is ook een mooi lering geweest vanuit de extra inzichten die de CT scans hebben geboden. Bijvoorbeeld bij buisdeel ID-0026 is nu duidelijker geworden wat de PipeScanner metingen laten zien bij zware mate van uitloging, vergelijkbare ultrasonische beelden zullen anders gerapporteerd worden in het vervolg. Daarnaast is het nodig om verschil in interpretatie van de resultaten te gebruiken. Waar bij CT scans 100% dekking mogelijk is en goed het reliëf van de hoogtekartaart kan worden bepaald, is het bij de PipeScanner beter om de maxima-minima en gemiddelde te gebruiken voor de bepaling van de conditie van de leiding.*

*Er wordt aanbevolen om ultrasonische metingen uit te voeren op buis delen die recent uit gebruik zijn genomen voor hogere kwaliteit metingen. Daarnaast zal Acquaint de dataverwerkings algoritmes en rapportage methodieken blijven doorontwikkelen.– Acquaint 2022.*

De buizen zijn enkele jaren voorafgaand aan dit onderzoek weliswaar luchtdicht ingepakt zodat deze niet uitgedroogd zijn, maar om mogelijke effecten van uitdroging uit te sluiten is een validatie van in-line metingen zoals Acquaint voorstelt inderdaad aan te bevelen. Het feit dat sterk uitgedroogde buizen zelfs in verzadigde toestand een moeilijk verwerkbaar signaal opleveren is lastiger te omzeilen, maar kan wellicht wel als een kwalitatieve indicatie van een slechte buis worden opgevat. Praktisch gezien verdient het daarnaast de aanbeveling om robuustere algoritmen voor dataverwerking te ontwikkelen. Het verdient daarmee ook de aanbeveling om de ruwe meetdata op dit moment te bewaren (en niet alleen een lijst met verwerkte data op te slaan) en deze te koppelen aan de locaties waar de buizen in bedrijf zijn/waren tot het moment dat deze verbeterde algoritmen beschikbaar zijn.



Juist omdat de lokale variatie in uitloging hoog blijkt te zijn (zoals ook al bleek uit eerder BTO onderzoek op basis van thymolftaleïne testen), is het vooralsnog níet aan te bevelen om van de pipescanner metingen enkel de minima en het gemiddelde te bepalen. Juist door de gehele profielen te bewaren krijgt men vingers achter de spreiding en verdeling in uitloging. Op het moment van schrijven start in het BTO een nieuw onderzoek waarin wordt uitgezocht hoeveel uitlogingsprofielen er nodig zijn om de (spreiding in) uitloging van een buis op een bruikbare manier te karakteriseren. Daar wordt ook uitgezocht hoe verschillende profielen het best vertaald kunnen worden naar een inschatting van conditie (bij wijze van aanvulling op de huidige KSLB methoden).

## 3 Herberekening sterkteproeven met CT

### 3.1 Inleiding

De bezwijkspanning en elasticiteitsmodulus vormen belangrijke invoer voor het voorspellen van leidingtoestand en -conditie. In het sterkteonderzoek uit 2017 zijn de waarden voor deze parameters bepaald voor de geteste AC leidingen. De interpretatie van de sterkteproeven werd voor dit eerdere onderzoek gebaseerd op aantastingsprofielen bepaald met radarmetingen (Beuken en van Laarhoven 2019). In dit hoofdstuk wordt de minimum wanddikte op het breukvlak bepaald met behulp van CT-scans, voor een herinterpretatie van de resultaten van deze eerdere sterkteproeven. Dit leidt tot nauwkeurigere materiaalwaarden die gebruikt kunnen worden bij conditiebepaling.

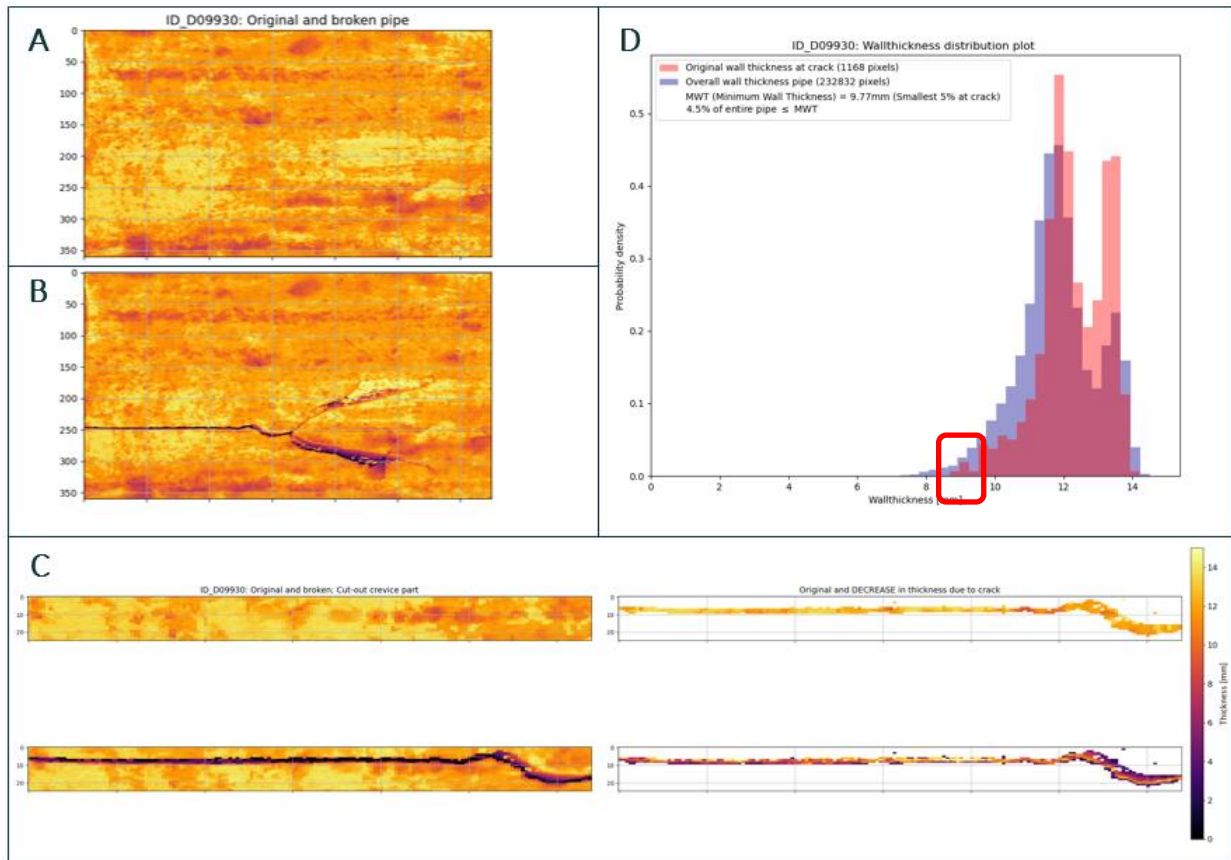
### 3.2 Aanpak

Bij het sterkteonderzoek zijn de buizen vooraf gescand met de CT-scanner, waarna ze belast werden tot bezwijken en daarna opnieuw gescand (Beuken en van Laarhoven 2019). In dit onderzoek wordt de scheur op de buis geïdentificeerd door deze twee CT-scans op elkaar te leggen (aan de hand van positionering van duidelijk karakteristieke patronen zoals de vorm van hotspots) waarna de locatie van de scheur gevonden wordt uit de ene scan, en de minimum wanddikte op die locatie gevonden wordt uit de andere scan. Dit nieuwe minimum wordt gebruikt voor het uitvoeren van de herberekening van de materiaalwaarden (methode beschreven in (Beuken en van Laarhoven 2019)).

#### 3.2.1 Identificeren minimum wanddikte op de scheur

Met Python (en de modules Scikit-image en Pandas) zijn de CT-scans van voor en na de breuk op elkaar gelegd en de wanddikte matrices van elkaar af getrokken, zie Figuur 5. De CT-scans in Figuur 5A en B worden op elkaar gelegd (in Figuur 5C wordt ingezoomd op de scheur). De scheur wordt geïdentificeerd door de wanddiktematrices te vergelijken. Op de meeste plaatsen zijn de scans vóór en na bezwijken identiek, maar op locatie van de scheur zijn er duidelijke verschillen (de wanddikte is 0, of in ieder geval substantieel kleiner wanneer de wand schuin is doorgescheurd). Door de pixels te identificeren die een wanddikteafname hebben doorgemaakt (de pixels van de scheur), en deze pixels te herleiden naar de originele CT-scan (zie Figuur 5C, rechtsboven) is de wanddikteverdeling op de scheur bepaald (zie Figuur 5D). Uit de wanddikteverdeling op de scheur worden de 5% pixels met de laagste wanddiktes gefilterd. Het gemiddelde van deze 5% is gedefinieerd als de minimum wanddikte op de scheurlocatie voordat de buis daadwerkelijk scheurde (zie Figuur 5D).

Voorwaarde voor deze aanpak is dat er een scan beschikbaar is van vóór en ná bezwijken. Daarbij is het belangrijk dat de buis ná de sterkteproef daadwerkelijk een scheur bevat en dat de buis in beide gevallen schoon was tijdens het scannen. Dit betrof 10 buizen op de gehele dataset



Figuur 5: Het proces om de minimum wanddikte van de scheur te identificeren. A) CT-scan originele buis voor de breuk, B) CT-scan na de breuk, C) selectie van het scheur gedeelte (links) en uitknippen van de scheur (rechtsboven) waarbij ook de wanddikteafname wordt weergegeven (rechtsonder)

In Figuur 5 is geïllustreerd hoe de scheur is geïdentificeerd en de wanddikte verdeling op de scheur is bepaald. Uit de wanddikte verdeling op de scheur volgt dat het minimum van de wanddikte op de scheur 8.7mm is.

### 3.2.2 Berekenen nieuwe materiaalwaarden

Per buis is de gemiddelde resterende wanddikte over de gehele buis bepaald aan de hand van de CT-scan. Daarnaast is met de CT-scan het minimum van de wanddikte op de locatie van de scheur voorafgaand aan het scheuren berekend. De gemiddelde resterende wanddikte en de minimum restwanddikte worden gebruikt voor de herberekening van respectievelijk de tangentele elasticiteitsmodulus en de bezwijkspanning. De methode hiervoor staat uitvoerig beschreven in (Beuken en van Laarhoven 2019).

## 3.3 Resultaten en discussie

Het proces geïllustreerd in Figuur 5 is herhaald voor alle buizen, zie Bijlage III. De resulterende gemiddelde en minimum restwanddiktes en de daaruit volgende nieuwe materiaalwaarden zijn per buis weergegeven in Tabel 3. De corresponderende oude materiaalwaarden zijn ook opgenomen.

Tabel 3: De oude en de nieuw bepaalde resterende wanddikte  $d$ , elasticiteitsmodulus  $E_t$ , minimale wanddikte  $d_{min}$  en faalspanning  $\sigma_f$ , per buis. Buis ID(nieuw) zijn de ID's gebruikt in dit rapport, buis ID(oud) zijn voorheen gebruikte ID's voor dezelfde buis. Buis ID<sup>2017</sup>,  $d_{min}^{2017}$ ,  $\sigma_f, d_{min}^{2017}$ ,  $d_{veld}^{2017}$ ,  $E_t, d_{veld}^{2017}$  werden gerapporteerd in (Beuken en van Laarhoven 2019). Hierin is  $d_{min}^{2017}$  gemeten met georadar of een schuifmaat.  $d_{gem}^{2021}$  is de

gemiddelde restwanddikte en  $d_{min}^{2021}$  is de minimum restwanddikte (o.b.v. gemiddelde 5% laagste wanddikte pixels) op de scheur, beide bepaald uit de CT-scans. Hieruit volgen de nieuw berekende waarden:  $E_{t,d_{gem}^{2021}}$  en  $\sigma_{f,d_{min}^{2021}}$ .

Buis ID (nieuw)	Buis ID (oud)	Buis ID <sup>2017</sup>	$d_{veld}^{2017}$ [mm]	$E_{t,d_{veld}^{2017}}$ [GPa]	$d_{min}^{2017}$ [mm]	$\sigma_{f,d_{min}^{2017}}$ [MPa]	$d_{gem}^{2021}$ [mm]	$E_{t,d_{gem}^{2021}}$ [GPa]	$d_{min}^{2021}$ [mm]	$\sigma_{f,d_{min}^{2021}}$ [MPa]
D09930	2018-10-02	D09930	17.0	2.4	15.6	13.4	10.5	2.9	9.8	21.4
168218	168218SE	168218	14.8	7.1	10.3	24.2	10.0	10.1	7.2	34.7
0026	0026	0026	15.0	2.7	12.7	12.6	9.2	4.3	4.7	34.0
D161290	D161290	D161290	15.1	3.2	12.9	17.4	11.4	4.1	7.1	31.7
D10427-01	D10427-01	P10427-01	14.8	2.8	12.3	17.0	12.1	3.3	11.4	18.4
P10915-1new	D10915-1	P10915	11.8	4.2	9.6	23.5	9.4	5.3	5.2	43.3
177340	177340	177340	14.6	2.8	11.9	13.9	11.5	6.0	8.3	19.9
D09586-1	D09586-1	D09586-1	13.0	3.8	11.5	10.9	6.8	6.4	5.8	21.6
177598	177598	177598	12.5	3.6	10.7	14	9.6	4.7	5.1	29.4

In Tabel 3 is  $d_{veld}^{2017}$  voor negen buisdelen gemeten met een schuifmaat of rolmaat tijdens een thymolftaleïne- of georadartest (Beuken en van Laarhoven 2019). Dit betreft simpelweg de originele wanddikte van de buis.  $d_{gem}^{2021}$  is voor dezelfde buisdelen bepaald uit de CT-scans. Hierbij wordt dus gecorrigeerd voor het ontbreken van materiaal vanwege degradatie. De E-modulus volgt uit een gemeten relatie tussen de druk in de buis en de daaruit volgende vervorming van het materiaal in de wand. Door te corrigeren voor het verdwenen materiaal mag de nieuw berekende tangentiële elasticiteitsmodulus,  $E_{t,d_{gem}^{2021}}$  worden gezien als meer accuraat dan de eerder berekende  $E_{t,d_{veld}^{2017}}$ . De nieuwe waarde varieert tussen de 2.9 en 10.1 GPa en ligt daarmee hoger dan de eerder berekende waarden. Deze nieuwe waarden voor de tangentiële elasticiteitsmodulus vallen alsnog substantieel lager uit dan de cataloguswaarde voor de Young's modulus van 20-25 GPa (Eternit N.V. 1980). Hoewel nog steeds geldt dat het aantal geteste buizen beperkt is, suggereert dit dat de buizen minder stijf zijn dan verwacht. Afgezien van de uitloging waarvoor hier is gecorrigeerd, is er geen verouderingsprincipe bekend dat zou leiden tot een daling van een eerdere elasticiteitsmodulus. Echter, een ideale Young's modulus is slecht gedefinieerd en geldig voor slechts zeer beperkte vervormingen bij keramische materialen zoals cement. Het is daarom denkbaar dat het verschil tussen de gevonden waarden en de waarden van Eternit voortkomen uit een verschil in meetmethode. Dit is ook besproken in (Beuken en van Laarhoven 2019).

De nieuw bepaalde  $d_{min}^{2021}$  ligt systematisch lager dan de eerder gemeten  $d_{min}^{2017}$ . Daar waar het originele minimum gemeten werd met thymolftaleïne is dit te verklaren vanwege het feit dat die test zelden het absolute minimum zal vinden bij inhomogene aantasting van de buis. Daar waar het originele minimum gemeten werd met georadar, moet de verklaring gezocht worden in de systematische onderschatting van de aantasting door deze techniek die eerder is geobserveerd (van Laarhoven en van Summeren, 2019). De nieuw berekende faalspanning ligt daardoor ook aanzienlijk hoger dan origineel gerapporteerd in (Beuken en van Laarhoven 2019) en varieert tussen de 18.4 en 43.3 MPa. Deze spreiding is nog steeds aanzienlijk, maar de waarden zijn wel meer in lijn met de faalspanning gerapporteerd door Eternit (30 MPa) en die als minimum genoemd wordt in de oude normen (23.5 MPa) (Eternit N.V. 1980).

De nieuwe materiaalwaarden – de faalspanning en de tangentiële elasticiteitsmodulus – kunnen in de eerst volgende toepassingen van COMSIMA (een spanningsmodel voor ondergrondse leidingen waarin verschillende belastingen op de leiding berekend worden (Wols, Moerman, en Vertommen 2015)) worden meegenomen tijdens de reguliere stappen rond het voorbereiden van de invoerdata en het toetsen van de gevoeligheid van het model daarvoor.

## 4 Invloed van heterogene aantasting op bezwijken

### 4.1 Inleiding

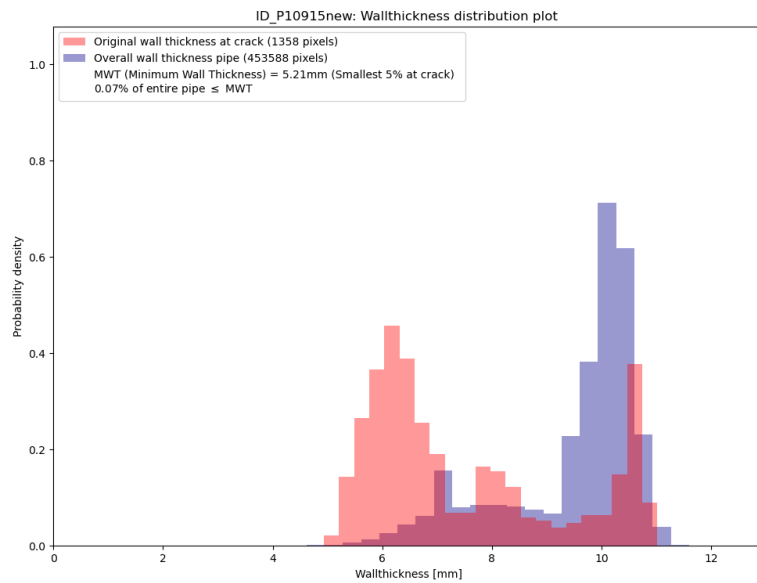
De huidige toestandsmodellen voor AC gaan uit van homogene aantasting. De invloed en omvang van gelokaliseerde zwaardere degradatie bij falen is onduidelijk. Door de CT-scan van een buis voor en na het bezwijken te vergelijken, kan bekeken worden of de scheur is opgetreden in een gebied met lokaal zwaardere aantasting. Dit geeft een eerste indicatie van het belang van inhomogene aantasting bij het bezwijken van AC buizen. Hiertoe kan de aantasting van het vlak waar de breuk is ontstaan herleid worden uit de CT-scans en vergeleken worden met de aantasting van de rest van de buis. Dit resulteert in een beter beeld van de eisen die de bedrijven moeten stellen aan het detail van de wanddiktemetingen die zij gebruiken voor conditiebepaling.

### 4.2 Aanpak

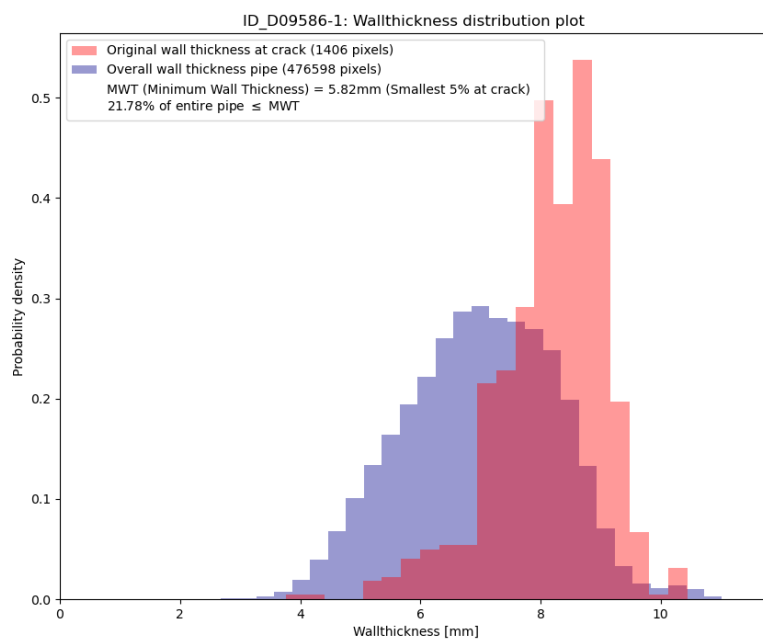
Om te bepalen of minima in restwanddikte een rol spelen bij het scheuren van de AC buizen, is de restwanddikteverdeling op de scheur vergeleken met de verdeling van restwanddikten over de gehele buis. De CT-verwerkingssoftware geeft de restwanddiktes op de hele buis en in hoofdstuk 3 is beschreven hoe de wanddiktes op de locatie van de scheur geïdentificeerd worden. De verdelingen kunnen in de vorm van histogrammen visueel worden vergeleken. Dit proces wordt herhaald voor 10 AC buizen waarvan de CT-scans voor en na de scheur beschikbaar zijn (zie hoofdstuk 3).

### 4.3 Resultaten en discussie

De resultaten van de 10 buizen waarvan de CT-scan voor en na de breuk vergeleken zijn, zijn te zien in Bijlage III. Als voorbeeld worden de wanddikteverdelingen van twee buizen getoond in Figuur 6 en Figuur 7.



*Figuur 6: Verdeling van de wanddiktes op de scheur (rood) en over de gehele buis (blauw) van buis P10915new. De afgeleide minimum wanddikte op de scheur is hier 5.21mm (gemiddelde van de 5 % laagste wanddiktes op de scheur), het percentage van pixels op de gehele buis dat een kleinere wanddikte heeft dan dit minimum is 0.07%.*

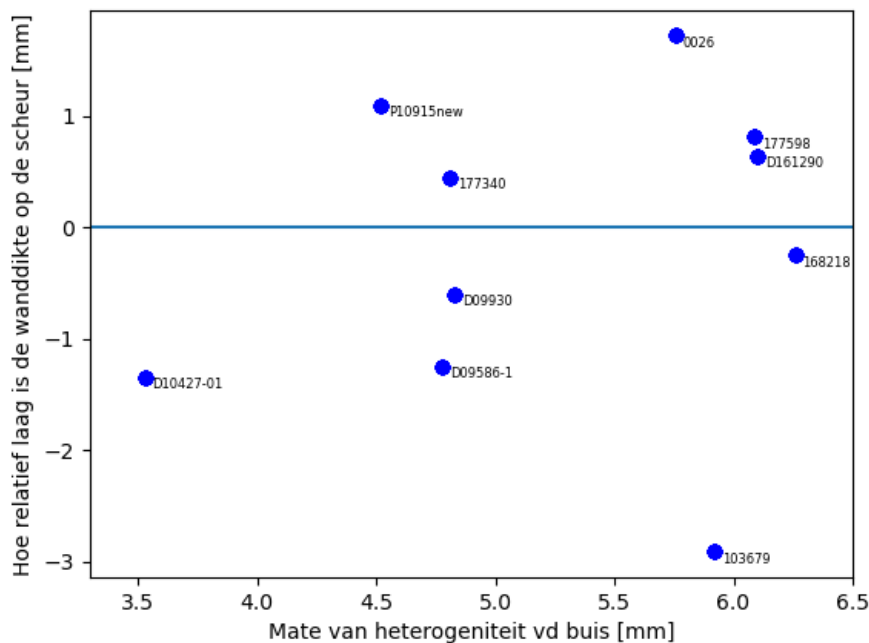


*Figuur 7: Kansdichtheid van de wanddiktes op de scheur (rood) en over de gehele buis (blauw) van buis D09586-1. De afgeleide minimum wanddikte op de scheur is hier 5.82mm (gemiddelde van de 5 % laagste wanddiktes op de scheur), het percentage van pixels op de gehele buis dat een kleinere wanddikte heeft dan dit minimum is 21.78%.*

Figuur 6 laat duidelijk zien dat de lagere wanddiktes oververtegenwoordigd waren op de locatie waar later de scheur optrad tijdens de bezwijkproeven, ten opzichte van de algemene verdeling van wanddiktes over de gehele buis. Dit laat zien dat de scheur is ontstaan in een zwakker deel van de buis dat lokaal al verder was aangetast. Dezelfde conclusie kan niet getrokken worden uit Figuur 7. Hierin zijn de hogere wanddiktes oververtegenwoordigd

op de locatie waar later de scheur optrad tijdens de bezwijkproeven. De resultaten van de 10 geanalyseerde buizen worden samengevat met twee maten die tegen elkaar zijn uitgezet in Figuur 8. De twee maten zijn:

- De mate van heterogeniteit van de buis. Dit is berekend door het gemiddelde te nemen van de 5% grootste wanddiktes op de buis minus het gemiddelde van de 5% kleinste wanddiktes op de buis;
- Een maat voor hoe gering de wanddikte op de scheur is. Deze is berekend door het gemiddelde te nemen van de 5% kleinste wanddiktes op de buis minus het gemiddelde van de 5% laagste wanddiktes op de scheur. Dus als deze maat positief is, zijn de kleinste wanddiktes op de scheur relatief gering ten opzichte van de buis.



Figuur 8: Buis en scheur analyse van de 10 geanalyseerde gescheurde buizen. Op de horizontale as: (Gemiddelde 5% hoogste wanddiktes op de buis) – (Gemiddelde 5% laagste wanddiktes op de buis). Op de verticale as: (Gemiddelde 5% laagste wanddiktes op de buis) – (Gemiddelde 5% laagste wanddiktes op de scheur).

Uit Figuur 8 valt af te lezen dat de mate van heterogeniteit tussen de 3.5mm en 6.5mm valt. Verder valt af te lezen dat bij 5 van de 10 buizen de scheur is ontstaan in een relatief zwak deel van de buis. Bij de andere 5 buizen is de scheur ontstaan in een deel waar de wanddikte relatief hoger lag dan de rest van de buis. Uit de resultaten valt daarmee geen eenduidige conclusie te trekken over de invloed van inhomogene aantasting op het ontstaan van de scheur. Hoewel het mag worden verwacht dat heterogene aantasting ook leidt tot verzwakking van AC buizen, zien we in deze eerste analyse dus niet dat de heterogene aantasting het scheurgedrag in de sterkteproeven consistent domineerde. Om te leren hoe een bepaalde inhomogene aantasting kan worden vertaald naar een bepaalde verzwakking zullen meer gedetailleerde spanningsberekeningen nodig zijn, bijvoorbeeld met behulp van eindige-elementenmethoden.

## 5 Ontwikkeling exitbeoordeling op basis van CT

### 5.1 Inleiding

Drinkwaterbedrijven voeren exitbeoordelingen en (niet-destructieve) inspecties uit om meer te leren over de toestand van het drinkwaternet. Met exitbeoordelingen wordt een (al dan niet-destructieve) inspectie bedoeld die wordt toegepast op een uitgenomen buis (maar lokale uitname en test worden ook wel vooraf ingezet bij de besluitvorming rond het al dan niet vernieuwen van het grotere tracé).

Een typische destructieve test die wordt ingezet bij exitbeoordelingen is de thymolftaline test. Niet destructieve technieken die zowel voor inspectie als voor exitbeoordelingen ingezet kunnen worden zijn bijvoorbeeld de PipeScanner (Hoofdstuk 2) of Georadar (van Laarhoven en van Summeren 2019). Het maken van CT-scans van AC buizen is een destructieve exitbeoordeling (omdat de buizen uitgenomen dienen te worden om te kunnen scannen). CT-scans geven echter veel meer informatie dan een thymolftaline test (iedere CT doorsnede geeft in principe de informatie van 1 thymolftaline test, zie ook (van Laarhoven en van Summeren 2019)). Daarnaast geven de CT-scans meer en nauwkeurigere informatie dan technieken zoals Georadar (van Laarhoven en van Summeren 2019) en de PipeScanner (Hoofdstuk 2 en (van Laarhoven 2019)).

Is het dan niet mogelijk en waardevol om deze techniek met enige regelmaat toe te passen voor exitbeoordelingen? En wat betekent dit voor kosten, veiligheid en wijze van uitnemen? In dit hoofdstuk worden de resultaten van een eerste inventarisatie gerapporteerd. Daarnaast wordt een protocol beschreven waarmee op grotere schaal AC buizen uitgenomen kunnen worden voor exitbeoordeling met CT-scans.

### 5.2 Inventarisatie beschikbaarheid en kosten van CT-metingen

Onderzoeken van AC worden vanwege de benodigde veiligheidsmaatregelen lang niet bij ieder laboratorium uitgevoerd. Aangezien TU Delft eerder bereid was om AC buizen te scannen, heeft de inventarisatie zich op deze organisatie gericht. De genoemde kosten in Tabel 4 zijn in 2020 doorgegeven; indexering en bijvoorbeeld strengere eisen voor verwerken AC kunnen tot prijsstijging leiden. De totale kosten voor verschillende hoeveelheden AC buizen zijn getoond in Tabel 5.

*Tabel 4: Details kosten analyse AC buizen met CT-scans.*

Initiële opstartkosten	€ 6.500
Om AC buizen te scannen moeten vooraf een aantal maatregelen worden getroffen zoals het huren van opslag, het inhuren van externe adviseur voor het nemen van twee kleefmonsters voor eerste kist met AC buizen, het nemen van kleef- en luchtmonsters in de CT-ruimte en voor toezicht op intern transport.	
Een dag beschikbaarheid van de scanner	€ 2.750
De AC buizen kunnen het beste in veelvoud van 50 buizen kunnen worden gescand. Dit is het maximale aantal buizen dat TU Delft per dag kan verwerken.	
Extra kleefmonsters	€ 1.250
Voor iedere extra kist moeten extra kleefmonsters en analyses worden uitgevoerd voor 250 €. Voor deze kostenberekening is uitgegaan van 50 buizen, 10 buizen per kist.	
TU Delft heeft momenteel geen insluiting beschikbaar waarin zij buizen opnieuw kunnen inpakken in geval van transportschade en dergelijke. Als een containment wel nodig blijkt te zijn, zullen de extra kosten in rekening worden gebracht. Dit kan echter worden voorkomen door de buizen deugdelijk te verpakken.	p.m.



<p>Gereedmaken script voor dataverwerking en delen met drinkwaterbedrijven</p> <p>Het script om de CT-data te verwerken en te vertalen naar een getalsmatige beschrijving van de degradatie is in voorgaand BTO-onderzoek reeds ontwikkeld. De verwachting is dat deze scripts in principe beschikbaar gemaakt kunnen worden voor de drinkwaterbedrijven als BTO-opbrengst. Het wordt wel voorzien dat er eenmalig kosten gemoeid zullen zijn met het gereedmaken van de code voor delen. Er moet dan gedacht worden aan het opschonen van de code en het aanleveren van een handleiding voor gebruik. (Op het moment van schrijven wordt door het CO en het BTO programmamanagement uitgewerkt hoe dergelijke scripts op een goed geborgde manier zouden moeten worden gedeeld).</p>	€ 3.000
---	---------

Tabel 5: Kosten voor analyse verschillende hoeveelheden AC buizen

# Buizen (van 1 meter)	Totale kosten	Kosten per buis
50	€ 12,250	€ 245
100	€ 15,000	€ 150
150	€ 17,750	€ 119
200	€ 20,500	€ 103

### 5.3 Standaard analyse

De CT-data die TU Delft aanlevert, wordt verkregen met een medische scanner van het type Siemens Somatom Definition.

#### Instellingen CT-scanner:

Bundel: 250 mA en 140 kVp. Scanner instellen op een pitch van 0,6 mm, een rotatietijd van 0,5 mm en een B50f kernel. Hiermee wordt 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.

#### Beeldverwerking

Voor de verwerking van de beelden naar getallen heeft KWR met behulp van Python, een beeldverwerkingsalgoritme opgesteld. Het algoritme zet met behulp van enkele basale beeldverwerkingsstappen een plaatje om naar een wanddikteprofiel over de omtrek. De stappen van het algoritme zijn terug te vinden in (van Laarhoven en van Summeren 2019).

### 5.4 Beschrijving protocol uitnemen AC buizen voor CT-meting

Bij uitnemen van de buis op locatie:

- Werk bij uitnemen AC buis volgens actuele richtlijnen waterbedrijven: <https://waterbedrijven.dearbocatalogus.nl/nl/hoofdproces/water/416/3033/3058>
- De AC buizen mogen maximaal een lengte hebben van 1,7 meter. Langere buizen moeten volgens richtlijnen op lengte worden geknipt.
- De AC buizen moeten zowel de binnen als buitenkant vrij worden gemaakt van onregelmatigheden zoals modder.
- Markeer bij alle buisdelen op drie plaatsen (begin, midden en eind buis) de bovenkant van de buis duidelijk met een watervaste stift.
- Codeer iedere buis met watervaste stift met een uniek nummer.
- Geef – indien bekend – met een pijl de stromingsrichting van het water aan op de buis

- Verpak de buisdelen dubbel en luchtdicht in hiervoor bestemde plastic zakken en zorg daarbij dat de buis een beetje vochtig is.
- Registreer het unieke nummer van de buis op formulier met daarnaast de locatie gegevens: Plaats, straat, huisnummer en x,y-coördinaten, zo mogelijk z (diepteligging) en zo mogelijk de lengte en wanddikte van het buisdeel.

Bij inpakken van AC buizen voor transport naar TU Delft:

- Werk bij het inpakken van de AC buis volgens de actuele richtlijnen voor waterbedrijven:  
<https://waterbedrijven.dearbocatalogus.nl/nl/hoofdproces/water/416/3033/3058>
- Verpak alle dubbel ingepakte AC buizen met maximale lengte van 1,7 meter in een voor transport geschikte kist.

## 5.5 Discussie en aanbeveling

Uit de evaluatie met de drinkwaterbedrijven blijkt dat de hierboven ingeschatte kosten die gemoeid zijn met deze test relatief gering zijn ten opzichte van andere tests. Daarnaast is er door het doen van CT scans veel bijvangst aan informatie en inzicht die je niet zou krijgen met reguliere exitbeoordelingen. Het wordt aanbevolen om op pilot schaal (eventueel met een aantal drinkwaterbedrijven gezamenlijk) een vijftigtal buizen te verzamelen en te laten scannen. Op die manier worden eventuele haken en ogen duidelijk en wordt inzichtelijk of de verminderde kosten en de substantiële verbetering in betrouwbaarheid en detailniveau van de metingen opweegt tegen de bijbehorende logistieke operatie en of de scans inderdaad goed vertaald kunnen worden naar een vorm die aansluit bij de context van reguliere exitbeoordelingen.

## 6 Verkenning potentieel CT voor PVC

### 6.1 Inleiding

Gezien het succes van het scannen van AC met CT en de gedetailleerde informatie die dit heeft opgeleverd, rijst natuurlijk de vraag of deze techniek ook toepasbaar is voor PVC. Binnen dit project was er niet veel tijd om hier aan te besteden, maar een aantal zaken zijn onderzocht.

### 6.2 Literatuuronderzoek

Literatuuronderzoek heeft geen extra informatie opgeleverd over ervaringen met het gebruiken van CT bij PVC leidingen.

### 6.3 Raadplegen experts universiteit

Vanuit TU Twente is door een expert aangegeven dat er binnen TU Twente geen ervaring was met CT-scans voor AC of PVC. Ook was onbekend of CT-scans gebruikt worden voor onderzoek naar materiaaleigenschappen van materialen zoals AC en PVC. Wel werd het door hem als mogelijk interessant gezien. CT-scans zijn gebruikt om de interne vezelbundelstructuur van composieten in kaart te brengen.

Vanuit TU Delft werd aangegeven dat bij het bij CT-werk om radiodichtheidsverschillen gaat. Dat is bij AC buizen redelijk zichtbaar te maken. De expert had geen ervaring met PVC buizen. Zijn advies is om proefstukken te sturen zodat we kunnen zien wat er aan informatie uit te halen is en wat de verschillen zijn.

### 6.4 Conclusie

Op dit moment lijkt er nog geen kennis van CT-scans bij PVC in de context van drinkwater. Of onvoldoende kwaliteit van PVC of de aanwezigheid van insluitingen leiden tot (voldoende) radiodichtheidsverschillen om informatie op te kunnen leveren is nog niet bekend. Op basis van de resolutie die haalbaar is met CT (sub millimeter) en de typische lengteschaal van PVC insluitingen die tot voortijdig falen leiden (1 tot 2 mm) is dit wel te verwachten. Het is daarom aan te bevelen om aantal proefstukken PVC te verzamelen met verschillende herkomst om deze met CT-scan te scannen en de resultaten te analyseren. Primair interessant zou het zijn om spanningsconcentratoren in PVC buizen te vinden (kleine insluitingen van afwijkend materiaal zoals zand, ijzer, samengeklonterde toevoegstoffen of verbrand PVC, die voor problemen zorgen bij lengteschalen rond 1 mm). Voor bulk eigenschappen zoals k-waarden en gelering zijn CT-scans waarschijnlijk niet de meest geschikte.

# 7 Conclusies

## 7.1 Conclusies

- De doorontwikkelde ultrasoonsensor van Acquaint is gevalideerd met CT. De nieuwe sensor presteert beter dan de vorige versie die met CT gevalideerd werd. Toch is het nog steeds zo dat deze US-sensor methode als geheel niet feilloos in staat is om op een robuuste manier metingen te nemen en te verwerken tot correcte wanddikteprofielen. We observeren dit ondanks het feit dat we bij de vergelijking steeds gekozen hebben voor een conservatieve aanpak die tegemoet komt aan eventuele meetfouten bij de ultrasoontechniek. Het vermoeden is dat de oorzaak bij de (handmatige of geautomatiseerde) verwerking van het ruwe ultrasoonsignaal gezocht moet worden.
- De tangentiële elasticiteitsmodulus (berekend uit de gemiddelde wanddikte op de leiding bepaald met de CT-scan) is hoger dan gemeten in het vorige onderzoek (Beuken en van Laarhoven 2019). Echter is deze nog steeds lager dan de waarde vermeld in de catalogus.
- De nieuwe faalspanning (berekend uit de minimum wanddikte op de scheur) is hoger dan gemeten in het vorige onderzoek (Beuken en van Laarhoven 2019). Er is nog steeds een grote spreiding in waarden, maar de gevonden waarden zijn veel beter in lijn met de waarden in de catalogus.
- Er is geen duidelijke invloed van inhomogene aantasting op het ontstaan van de scheur tijdens de sterkteproeven gevonden.
- Met enige zorg voor een veilige logistiek is het haalbaar om exitbeoordelingen met CT op te zetten tegen relatief lage kosten, terwijl de informatiewinst relatief hoog is.

## 7.2 Aanbevelingen voor implementatie van de resultaten

De doorontwikkelde ultrasoonsensor presteert beter dan eerder gevalideerde methoden (eerste generatie ultrasoon, georadar) en lijkt daarmee op dit moment een veelbelovende niet destructieve techniek om AC restwanddikte te meten. Wel moet worden opgemerkt dat het bij in-line of uitwendige toepassingen (waarbij de leiding nog in bedrijf is en er geen segment kan worden uitgenomen) gaat om een meting van de procentuele restwanddikte die alleen naar een daadwerkelijke restwanddikte kan worden vertaald met behulp van (waterbedrijf-)data over de werkelijke originele wanddikte van de AC buis. Die essentiële aanvullende assetinformatie is echter typisch beperkt beschikbaar in de systemen van de drinkwaterbedrijven en vormt dus een beperking voor toepassing op leidingen die nog in bedrijf zijn. Daarnaast is in Hoofdstuk 2 getoond dat de techniek nog niet robuust genoeg is om de uitkomsten blind te vertrouwen. Met oog op bovenstaande punten wordt het volgende aanbevolen:

- Gebruik de techniek, maar sla de ruwe ultrasoon data op, met het vertrouwen dat er in de toekomst betere dataverwerkingsalgoritmen beschikbaar zullen komen en betere assetinformatie rond de originele wanddikte.
- Met oog op toekomstige toepassing van US op leidingen in bedrijf wordt aanbevolen om wanddiktemetingen te doen op natuurlijke momenten en deze te integreren in het LIS (leiding informatie systeem).
- Met oog op exitbeoordelingen wordt ten eerste aanbevolen om te overwegen in plaats van US gebruik te maken van CT, waarbij een extra logistieke stap ogenschijnlijk een reductie in kosten en een nog hogere informatiedichtheid tot gevolg kan hebben.
- Met oog op metingen met behulp van US wordt aanbevolen om in ieder geval meerdere lengte en omtrekprofielen te meten (met betrekking tot de vraag hoeveel profielen gemeten moeten worden: zie ook de aanbevelingen in 7.3). Vanwege de beperkte robuustheid van de techniek is een enkel US profiel inferieur aan een enkele thymolfaleïne meting qua nauwkeurigheid; alleen bij het meten van meerdere profielen heeft US

daarom een meerwaarde binnen de context van exitbeoordelingen (de voordelen van de niet-destructieve aard van US voor in-line metingen blijven uiteraard overeind). Zie (Beuken en van Laarhoven, 2019; van Laarhoven en van Summeren, 2019) voor meer achtergrond over de nauwkeurigheid van de thymolftaleïne test vanuit het theoretisch perspectief en vanuit vergelijkingen met CT).

- Gezien de nauwkeurigheid en relatief geringe kosten van CT-scans wordt het aangeraden om een grootschaligere pilot op te zetten waarin CT-scans als exitbeoordeling worden gebruikt met als doel praktijk ervaring op te doen rond de daadwerkelijke haalbaarheid van de benodigde logistieke stappen. Daarbij kan er voor de logistiek hulp gezocht worden bij een overkoepelende partij die waterbedrijven daarbij ondersteunt. De opgedane ervaring zou vervolgens kunnen landen in de PCD-6 over conditiebepaling.

Het wordt aangeraden om de in dit rapport nieuw bepaalde materiaalwaarden – de faalspanning en de tangentiële elasticiteitsmodulus – in de eerst volgende toepassingen van COMSIMA mee te nemen tijdens de reguliere stappen rond het voorbereiden van de invoerdata en het toetsen van de gevoeligheid van het model daarvoor.

### 7.3 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

- Om te leren hoe een bepaalde inhomogene aantasting kan worden vertaald naar een bepaalde verzwakte conditie wordt het aangeraden meer gedetailleerde spanningsberekeningen te doen, bijvoorbeeld met behulp van eindige-elementenmethoden.
- Indien de drinkwaterbedrijven inderdaad een pilot rond grootschalige exitbeoordelingen met CT uitvoeren, wordt aanbevolen om met de daaruit voortkomende data ook te onderzoeken of er in de ongetwijfeld inhomogene uitloging typische patronen aan te wijzen zijn, zoals de beperkte CT-data die nu beschikbaar is suggereert. Een deelvraag is daarbij of opeenvolgende buissegmenten vergelijkbaar zijn qua mate van inhomogeniteit. Op die manier ‘wordt de mate van onvoorspelbaarheid van uitloging voorspelbaar’. Daaruit volgt het inzicht hoe de exitbeoordeling van één segment moet worden ingericht om – ondanks de grote variatie in uitloging die ons in het verleden heeft ontmoedigd om exitbeoordelingen te doen – wat te kunnen zeggen over het gehele tracé.
- In vervolgonderzoek ter validatie van meetmethoden met CT kunnen naast de BMF-waarden ook gedetailleerdere kwantitatieve samenvattingen van een vergelijking van technieken worden gebruikt, zoals bijvoorbeeld met een Mean Percentage Error of een Mean Absolute Error.
- Om het gebruik van de ultrasoonsensor te sturen wordt het aangeraden om met behulp van CT-scans te onderzoeken hoeveel lijnprofielen er gemeten moeten worden om de inhomogeniteit van de aantasting van een buis goed te vangen. Dit onderzoek zou als volgt opgezet kunnen worden:
  - a uit een verwerkte CT-scan kan een US-meting geëmuleerd worden door één lijnprofiel uit de data te nemen over een bepaalde positie op de buis (hierbij zouden eventueel nog scenario's waarbij de meting incomplete data oplevert kunnen worden betrokken);
  - b op dezelfde manier kan de meetserie van een toestandsbepaling geëmuleerd worden, door de lijnprofielen te verzamelen zoals dat in het veld zou gebeuren (bijvoorbeeld lijnprofielen op 4 klokstanden);
  - c de uitkomsten van deze toestandsbepaling kunnen worden samengevat in termen van bijvoorbeeld de minimum restwanddikte, de gemiddelde restwanddikte, de typische lengteschaal van inhomogene aantasting, enzovoorts;
  - d vervolgens kan in beeld worden gebracht hoeveel de uitkomsten van de meetserie kunnen variëren vanwege de toevallige oriëntatie van de meting ten opzichte van het uitlogingspatroon van de buis. Dit gebeurt door de geëmuleerde toestandsbepaling te herhalen voor veel verschillende oriëntaties van de buis (effectief geeft dit de verschillen tussen: 12,3,6,9 uur; 1,4,7,10 uur; ...);
  - e tenslotte kan dan worden bepaald hoeveel de mogelijke spreiding in uitkomsten kan worden teruggedrongen door de meetdichtheid te vergroten (meetserie met lijnprofielen op 5 of nog meer klokstanden, meetserie met ook omtreksprofielen);

- f om rekening te houden met de verschillende uitlogingspatronen in buizen moet dit herhaald worden voor een aantal representatieve scans (er zal een hogere dichtheid nodig zijn om een 'maanlandschap' betrouwbaar te vangen dan voor een homogeen uitgeloopte buis).
- Het wordt aanbevolen om een aantal proefstukken PVC te verzamelen met verschillende herkomst en deze met CT-scan te scannen en de resultaten te analyseren. Daarbij moet met name uitgeprobeerd worden of insluitingen of zelfs beginnende haarscheurtjes zichtbaar gemaakt kunnen worden. Aangezien er vooralsnog geen technieken bekend zijn om op voorhand deze insluitingen of scheurtjes vast te stellen in drinkwaterleidingen, is het lastig om proefstukken te kiezen waarin deze zeker zijn terug te vinden. Bij teststukken uit het veld heeft het de voorkeur om deze te verzamelen uit schadegevallen waarbij een ijzerinsluiting of een verglaasd deeltje PVC is aangetroffen op het breukvlak, in de hoop dat er meer van deze deeltjes aanwezig waren. Hierbij moet waarschijnlijk worden afgegaan op de kennis van gebiedsbeheerders die vanuit hun overzicht typerend scheurgedrag kunnen waarnemen op bepaalde tracés.

# I Referenties

Awaja, Firas, Shengnan Zhang, Manoj Tripathi, Anton Nikiforov, en Nicola Pugno. 2016. "Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: Formation, detection, autonomic repair". *Progress in Materials Science* 83: 536–73. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.07.007>.

Beuken, R.H.S., en K.A. van Laarhoven. 2019. "Sterkteonderzoek asbestcementbuizen". BTO2019.008, KWR, Nieuwegein.

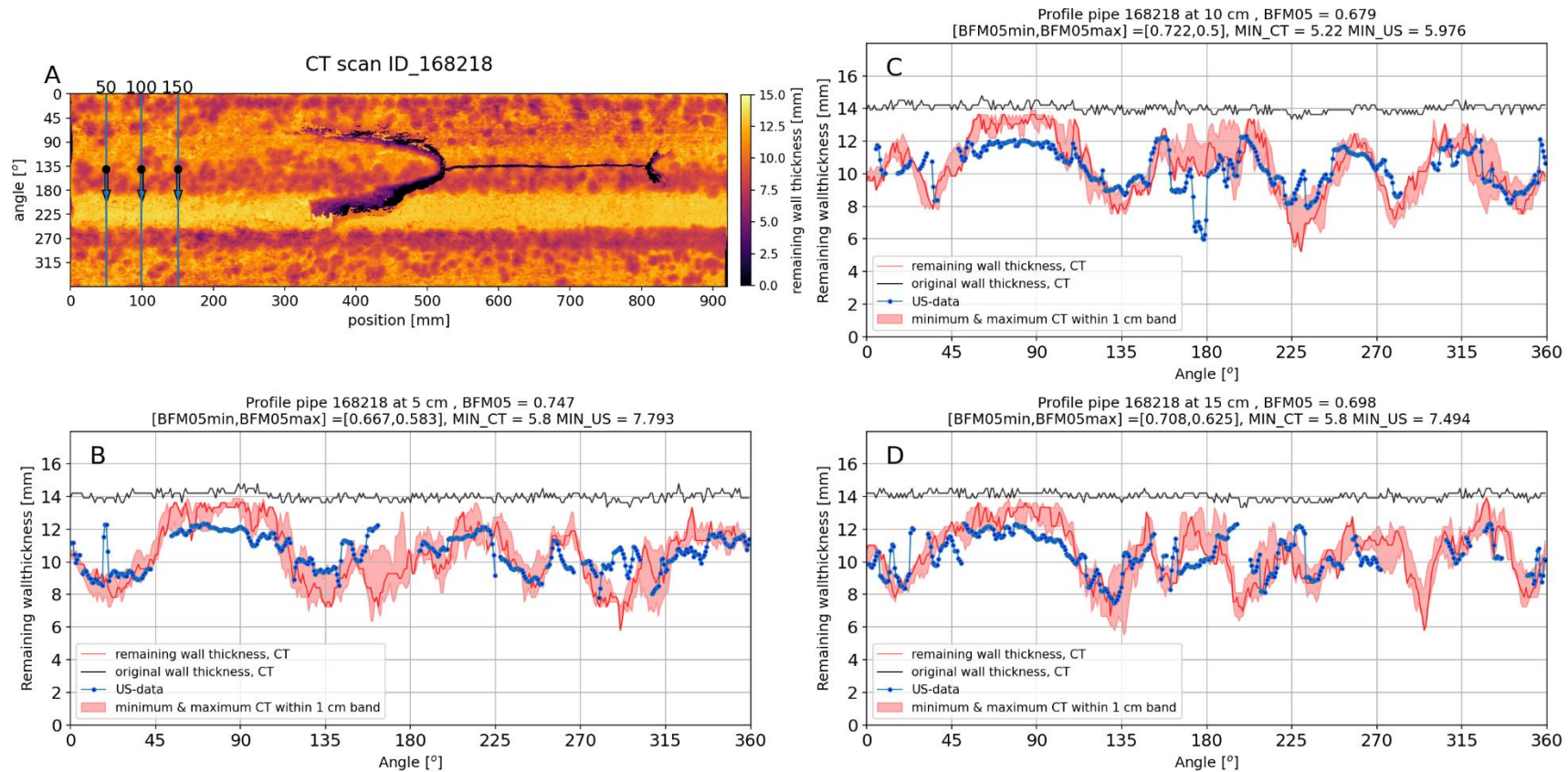
Eternit N.V. 1980. *Catalogus voor AC persleidingen en hulpstukken van Eternit N.V.* Het jaar van publicatie ligt rond 1980.

Laarhoven, K.A. van. 2019. "Condition assessment of asbestos cement : validation of an ultrasonic technique with CT". BTO2019.102, KWR, Nieuwegein.

Laarhoven, K.A. van, en J.R.G. van Summeren. 2019. "Röntgentomografie als meetmethode voor toestandsbepaling van AC leidingen". BTO2019.010, KWR, Nieuwegein.

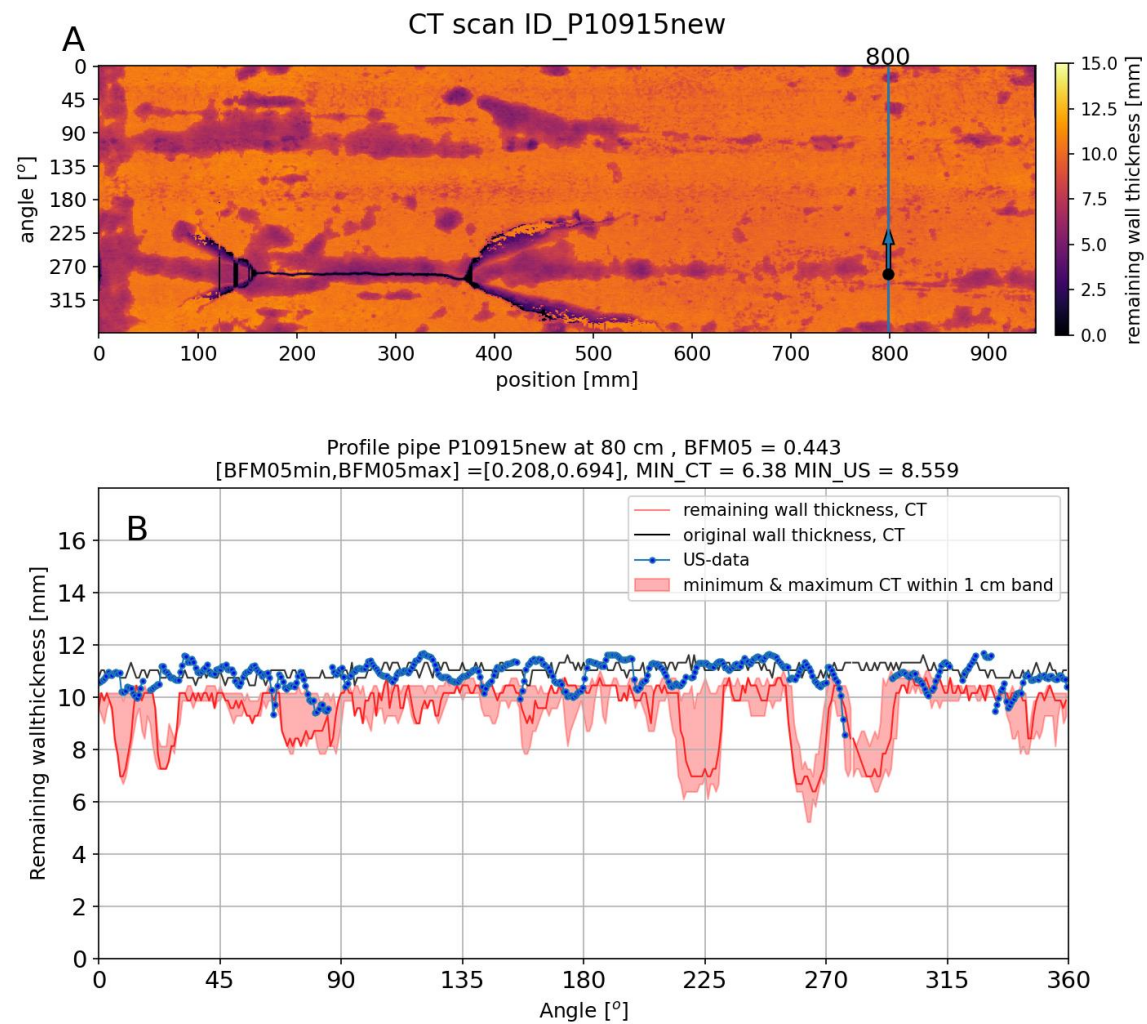
Wols, B.A., A. Moerman, en I. Vertommen. 2015. "Comsima: model voor spanningen op ondergrondse leidingen (BTO 2015.82)" 206 (December).

## II US-validatie met CT-resultaten

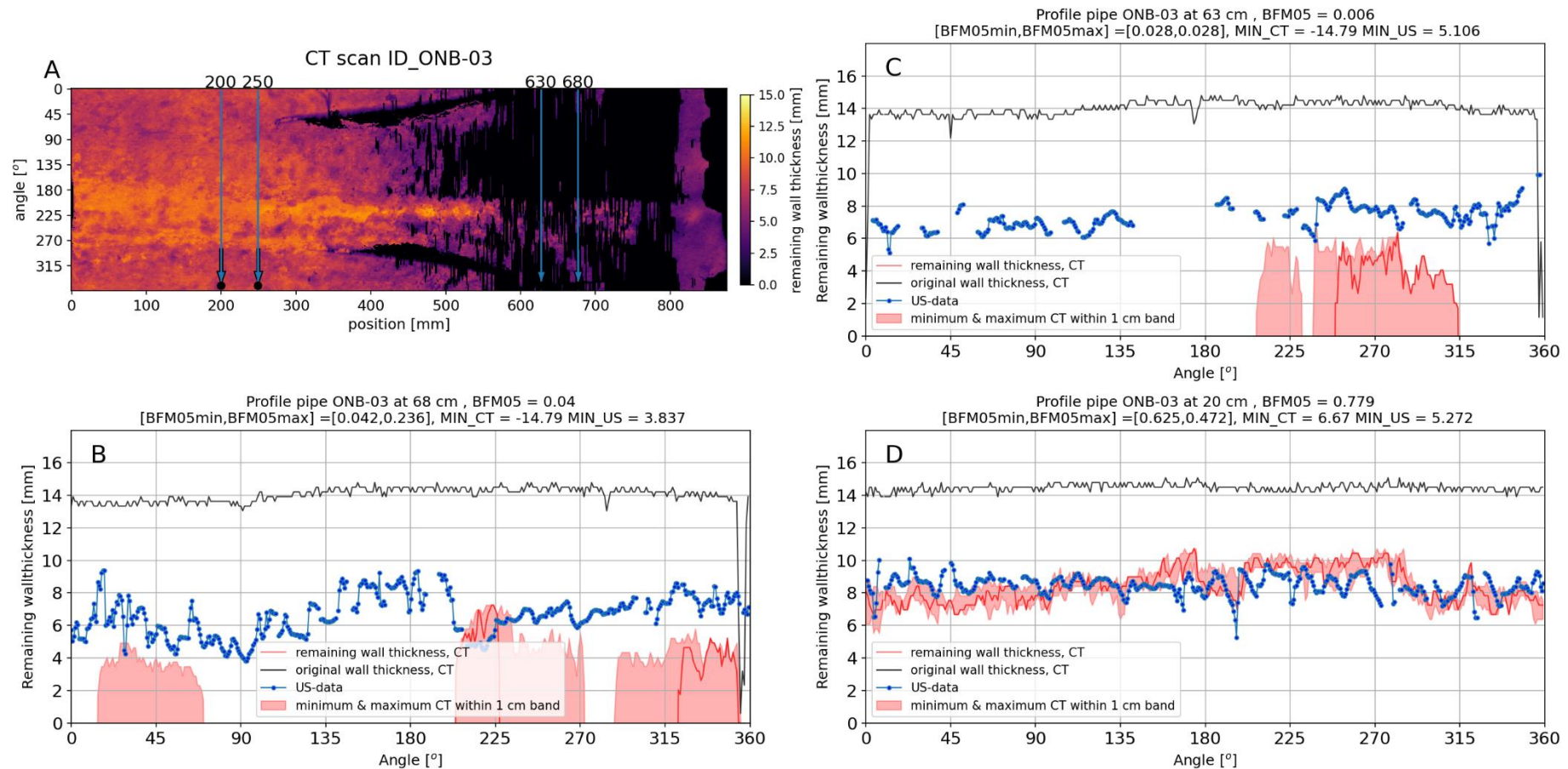


Figuur 9: In dit figuur worden de US-scans vergeleken met de CT-scan voor buis 168218. A) CT-scan van de buis met daarin de positie(s) van de US-scan(s) aangegeven met een blauwe verticale lijn. Het zwarte punt en de pijl op de lijn geven de startpositie en richting aan van het CT profiel, dit om te corrigeren voor de startpositie en richting van de US-data. B,C,D) US-data (blauw) vergeleken met CT-data (rood) op de betreffende positie. De bandbreedte in rood geeft het minimum en het maximum van 1cm bandbreedte (zie hoofdttekst). De originele wanddikte is weergegeven in zwart.

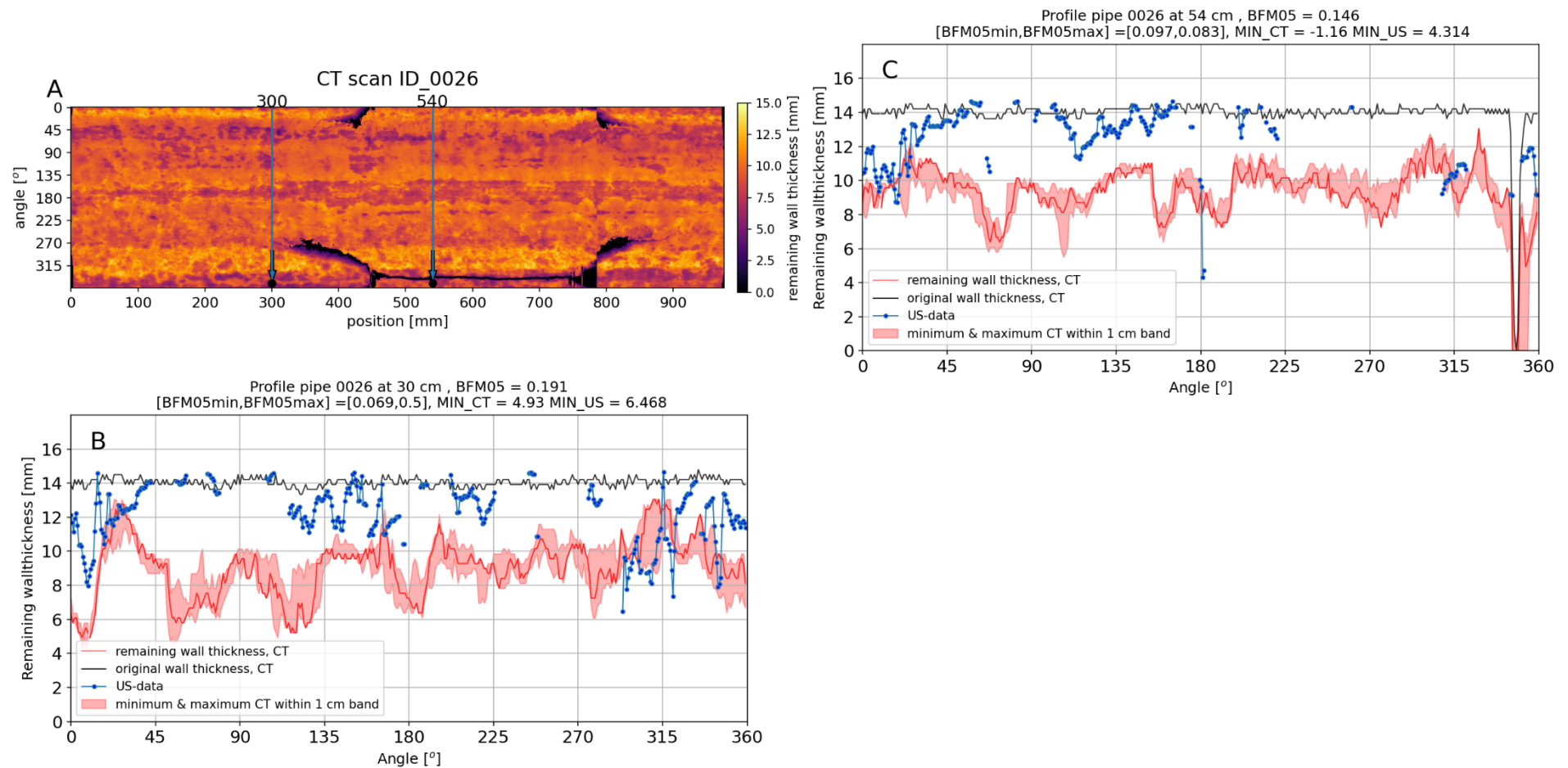




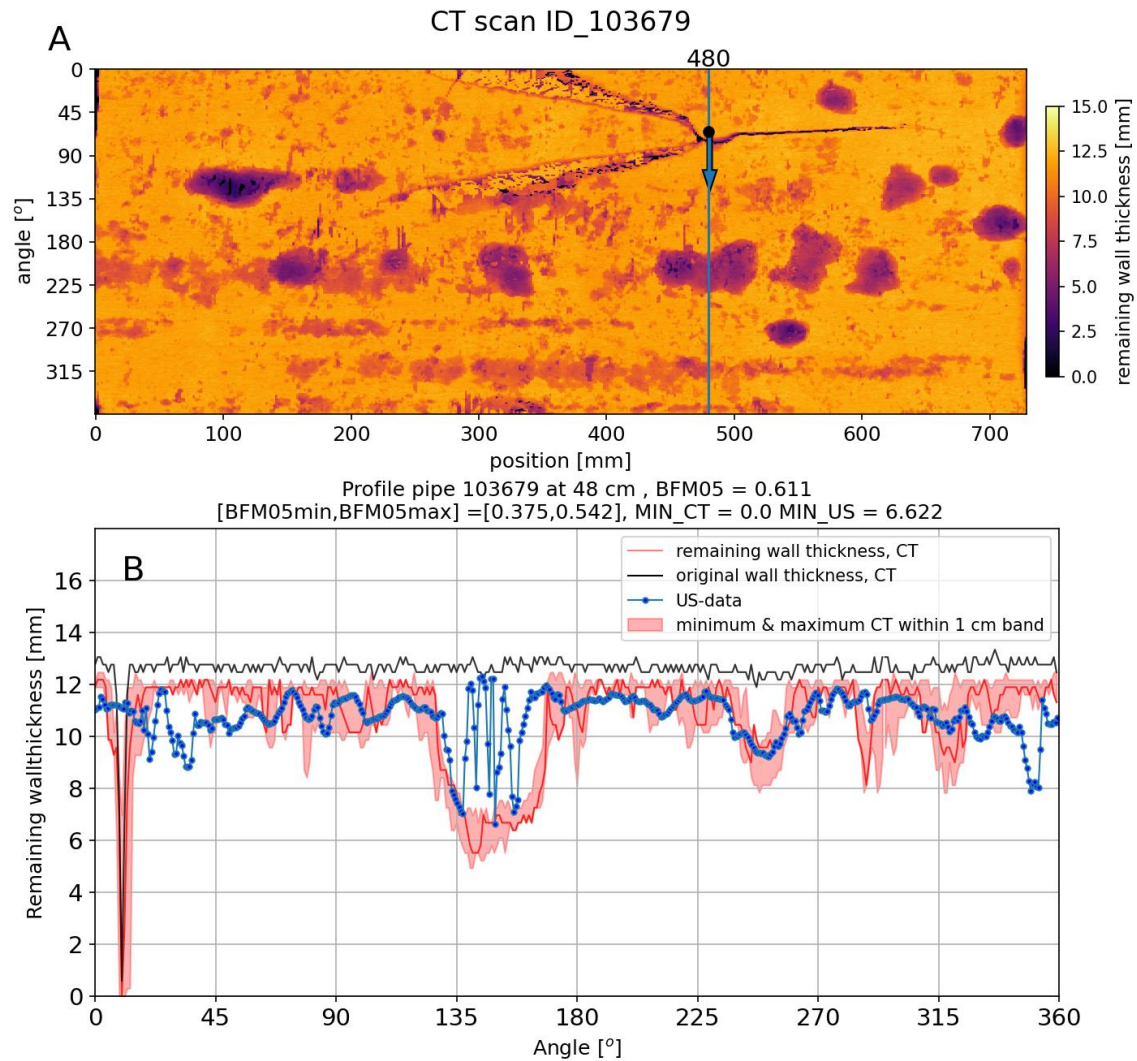
Figuur 10: In dit figuur worden de US-scans vergeleken met de CT-scan voor buis P10915new. A) CT-scan van de buis met daarin de positie(s) van de US-scan(s) aangegeven met een blauwe verticale lijn. Het zwarte punt en de pijl op de lijn geven de startpositie en richting aan van het CT profiel, dit om te corrigeren voor de startpositie en richting van de US-data. B) US-data (blauw) vergeleken met CT-data (rood) op de betreffende positie. De bandbreedte in rood geeft het minimum en het maximum van 1cm bandbreedte. De originele wanddikte is weergegeven in zwart.



Figuur 11: In dit figuur worden de US-scans vergeleken met de CT-scan voor buis ONB-03 (deel 1). A) CT-scan van de buis met daarin de positie(s) van de US-scan(s) aangegeven met een blauwe verticale lijn. Het zwarte punt en de pijl op de lijn geven de startpositie en richting aan van het CT profiel, dit om te corrigeren voor de startpositie en richting van de US-data. B,C,D) US-data (blauw) vergeleken met CT-data (rood) op de betreffende positie. De bandbreedte in rood geeft het minimum en het maximum van 1cm bandbreedte (zie hoofdstekst). De originele wanddikte is weergegeven in zwart.

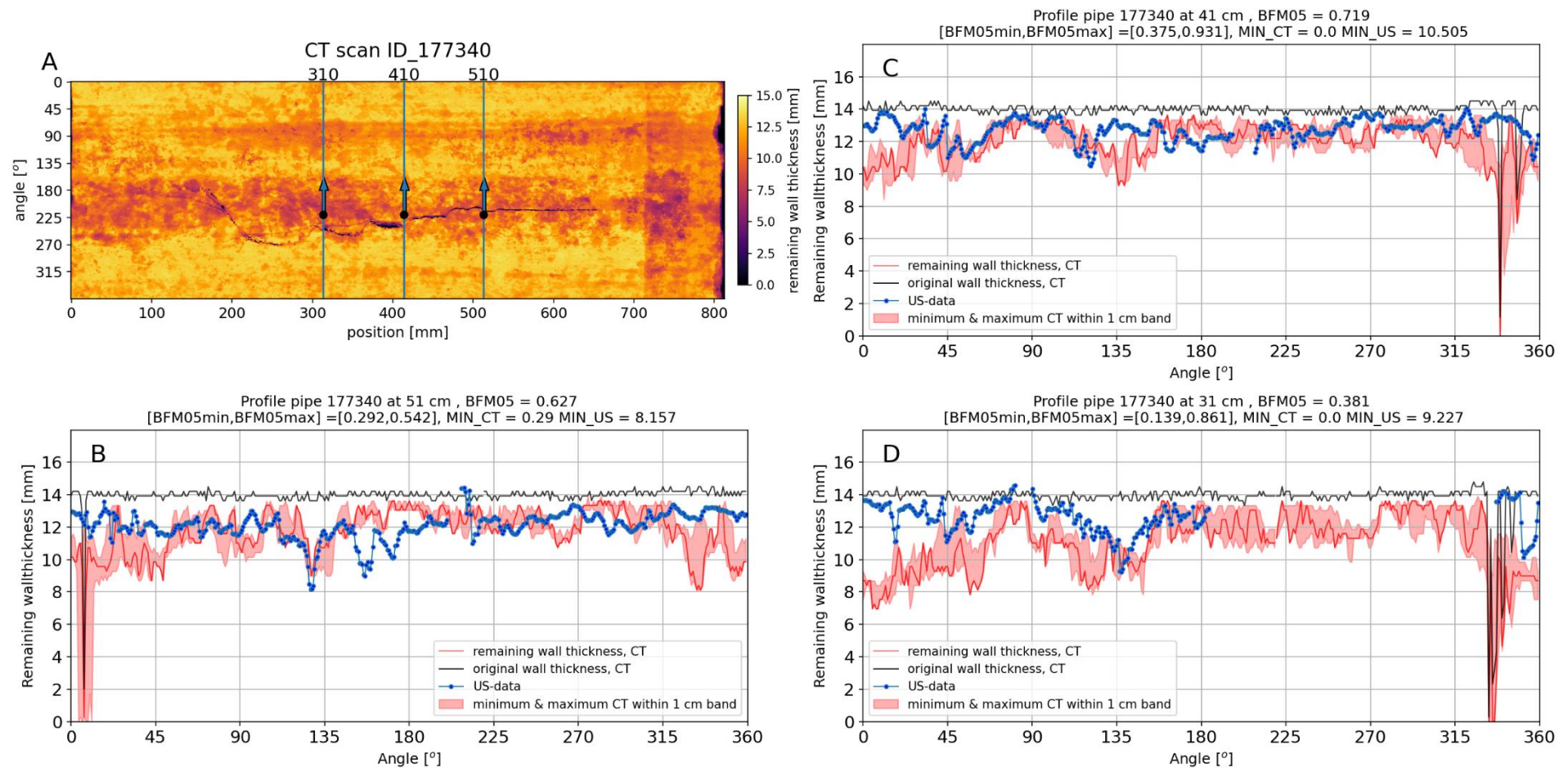


Figuur 12: In dit figuur worden de US-scans vergeleken met de CT-scan voor buis 0026. A) CT-scan van de buis met daarin de positie(s) van de US-scan(s) aangegeven met een blauwe verticale lijn. Het zwarte punt en de pijl op de lijn geven de startpositie en richting aan van het CT profiel, dit om te corrigeren voor de startpositie en richting van de US-data. B,C) US-data (blauw) vergeleken met CT-data (rood) op de betreffende positie. De bandbreedte in rood geeft het minimum en het maximum van 1cm bandbreedte (zie hoofdtekst). De originele wanddikte is weergegeven in zwart.

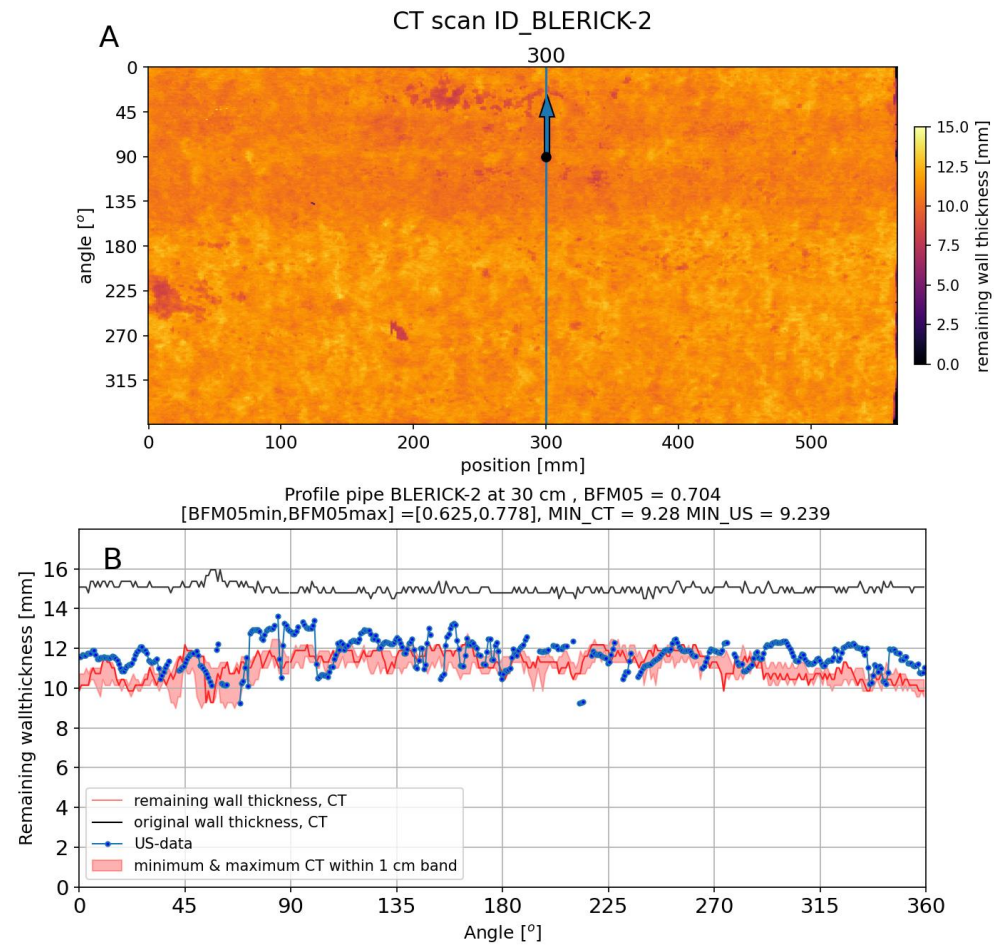


Figuur 13: In dit figuur worden de US-scans vergeleken met de CT-scan voor buis 103679. A) CT-scan van de buis met daarin de positie(s) van de US-scan(s) aangegeven met een blauwe verticale lijn. Het zwarte punt en de pijl op de lijn geven de startpositie en richting aan van het CT profiel, dit om te corrigeren voor de startpositie en richting van de US-data. B) US-data (blauw) vergeleken met CT-data (rood) op de betreffende positie. De bandbreedte in rood geeft het minimum en het maximum van 1cm bandbreedte (zie hoofddekst). De originele wanddikte is weergegeven in zwart.

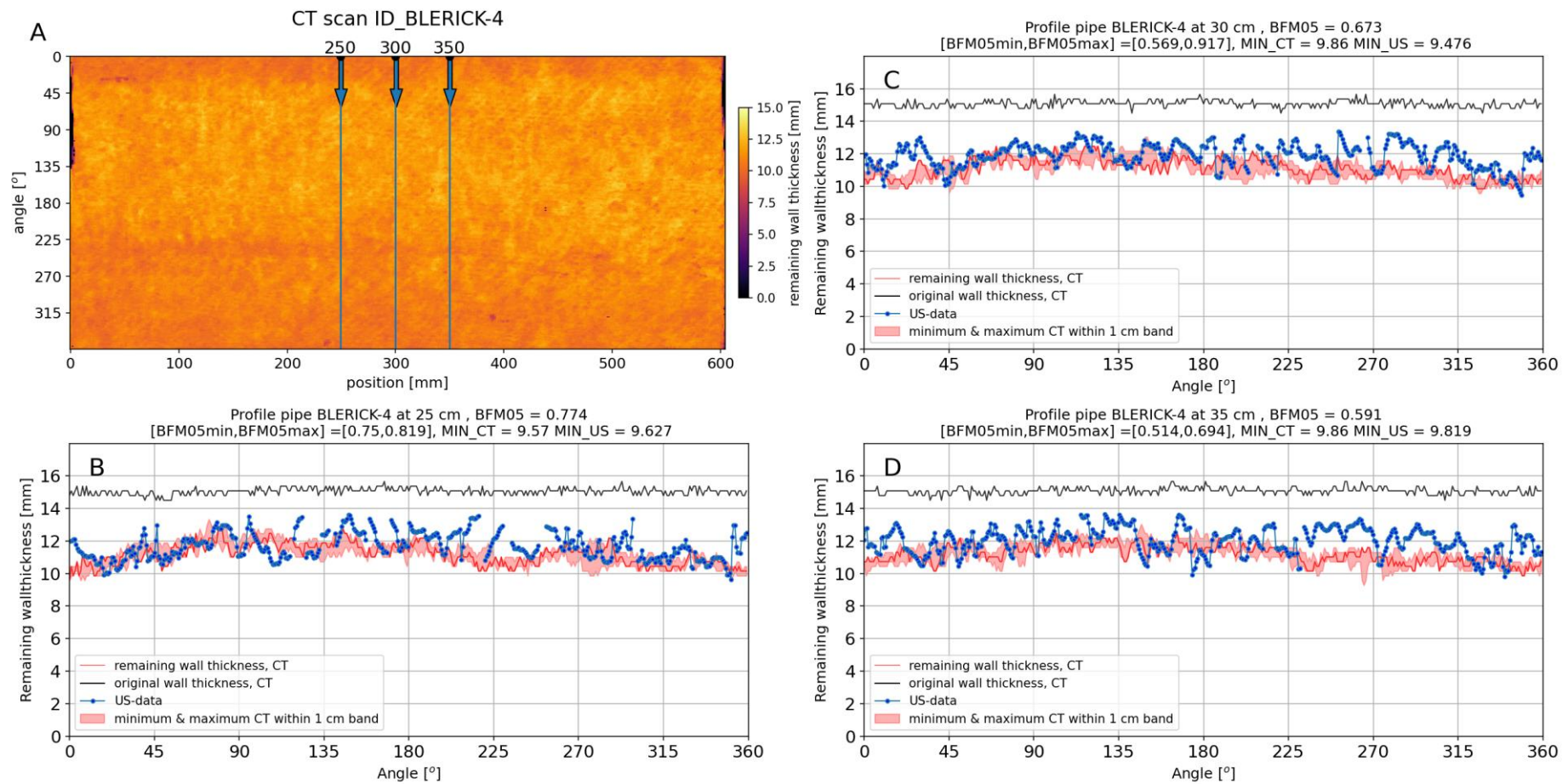




Figuur 14: In dit figuur worden de US-scans vergeleken met de CT-scan voor buis 177340. A) CT-scan van de buis met daarin de positie(s) van de US-scan(s) aangegeven met een blauwe verticale lijn. Het zwarte punt en de pijl op de lijn geven de startpositie en richting aan van het CT profiel, dit om te corrigeren voor de startpositie en richting van de US-data. B,C,D) US-data (blauw) vergeleken met CT-data (rood) op de betreffende positie. De bandbreedte in rood geeft het minimum en het maximum van 1cm bandbreedte (zie hoofdtekst). De originele wanddikte is weergegeven in zwart.

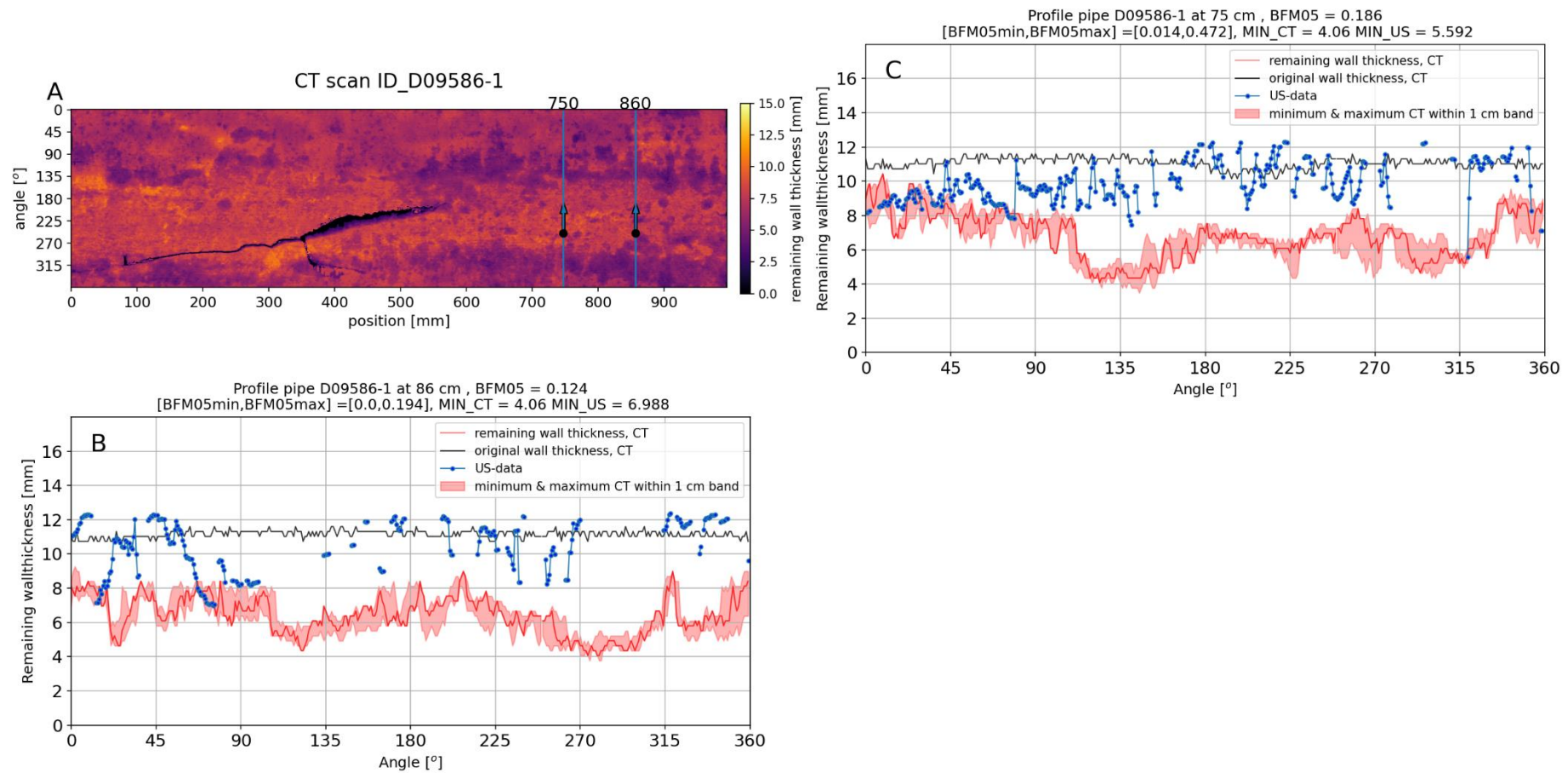


Figuur 15: In dit figuur worden de US-scans vergeleken met de CT-scan voor buis BLERICK-2. A) CT-scan van de buis met daarin de positie(s) van de US-scan(s) aangegeven met een blauwe verticale lijn. Het zwarte punt en de pijl op de lijn geven de startpositie en richting aan van het CT profiel, dit om te corrigeren voor de startpositie en richting van de US-data. B) US-data (blauw) vergeleken met CT-data (rood) op de betreffende positie. De bandbreedte in rood geeft het minimum en het maximum van 1cm bandbreedte (zie hoofdtekst). De originele wanddikte is weergegeven in zwart.



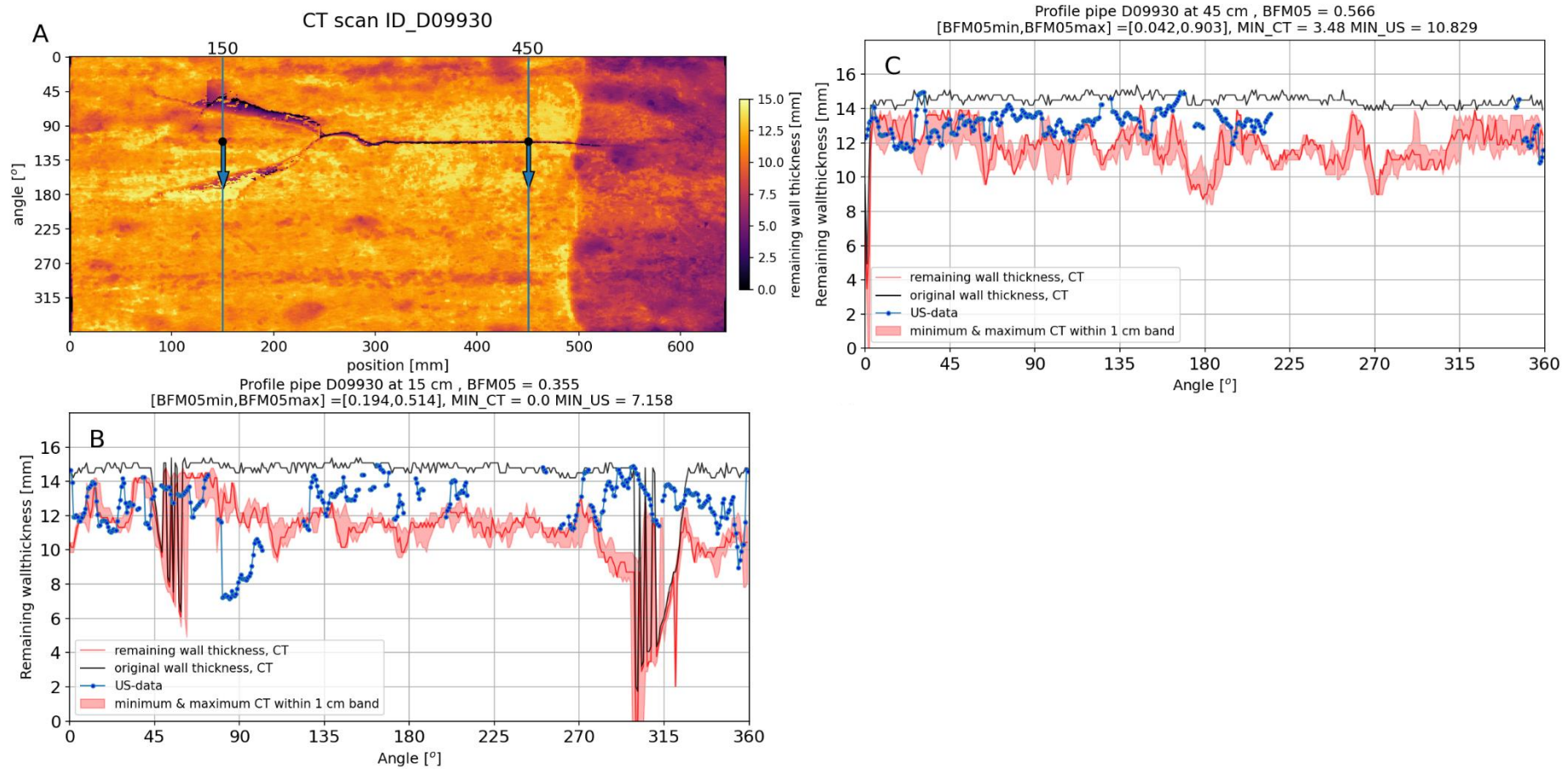
Figuur 16: In dit figuur worden de US-scans vergeleken met de CT-scan voor buis BLERICK-4. A) CT-scan van de buis met daarin de positie(s) van de US-scan(s) aangegeven met een blauwe verticale lijn. Het zwarte punt en de pijl op de lijn geven de startpositie en richting aan van het CT profiel, dit om te corrigeren voor de startpositie en richting van de US-data. B,C,D) US-data (blauw) vergeleken met CT-data (rood) op de betreffende positie. De bandbreedte in rood geeft het minimum en het maximum van 1cm bandbreedte (zie hoofdstkst). De originele wanddikte is weergegeven in zwart.



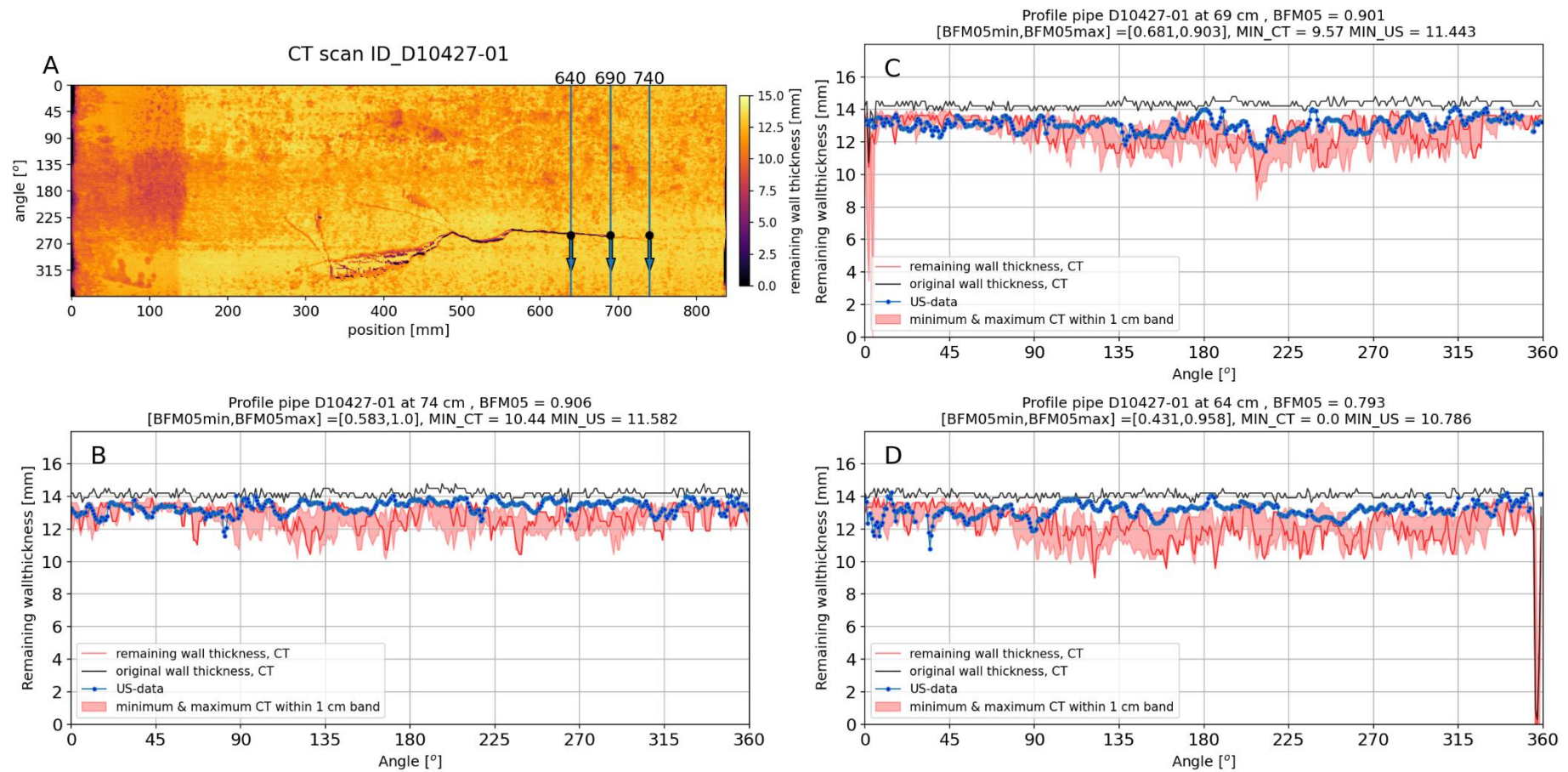


Figuur 17: In dit figuur worden de US-scans vergeleken met de CT-scan voor buis D09586-1. A) CT-scan van de buis met daarin de positie(s) van de US-scan(s) aangegeven met een blauwe verticale lijn. Het zwarte punt en de pijl op de lijn geven de startpositie en richting aan van het CT profiel, dit om te corrigeren voor de startpositie en richting van de US-data. B,C) US-data (blauw) vergeleken met CT-data (rood) op de betreffende positie. De bandbreedte in rood geeft het minimum en het maximum van 1cm bandbreedte (zie hoofdstekst). De originele wanddikte is weergegeven in zwart.

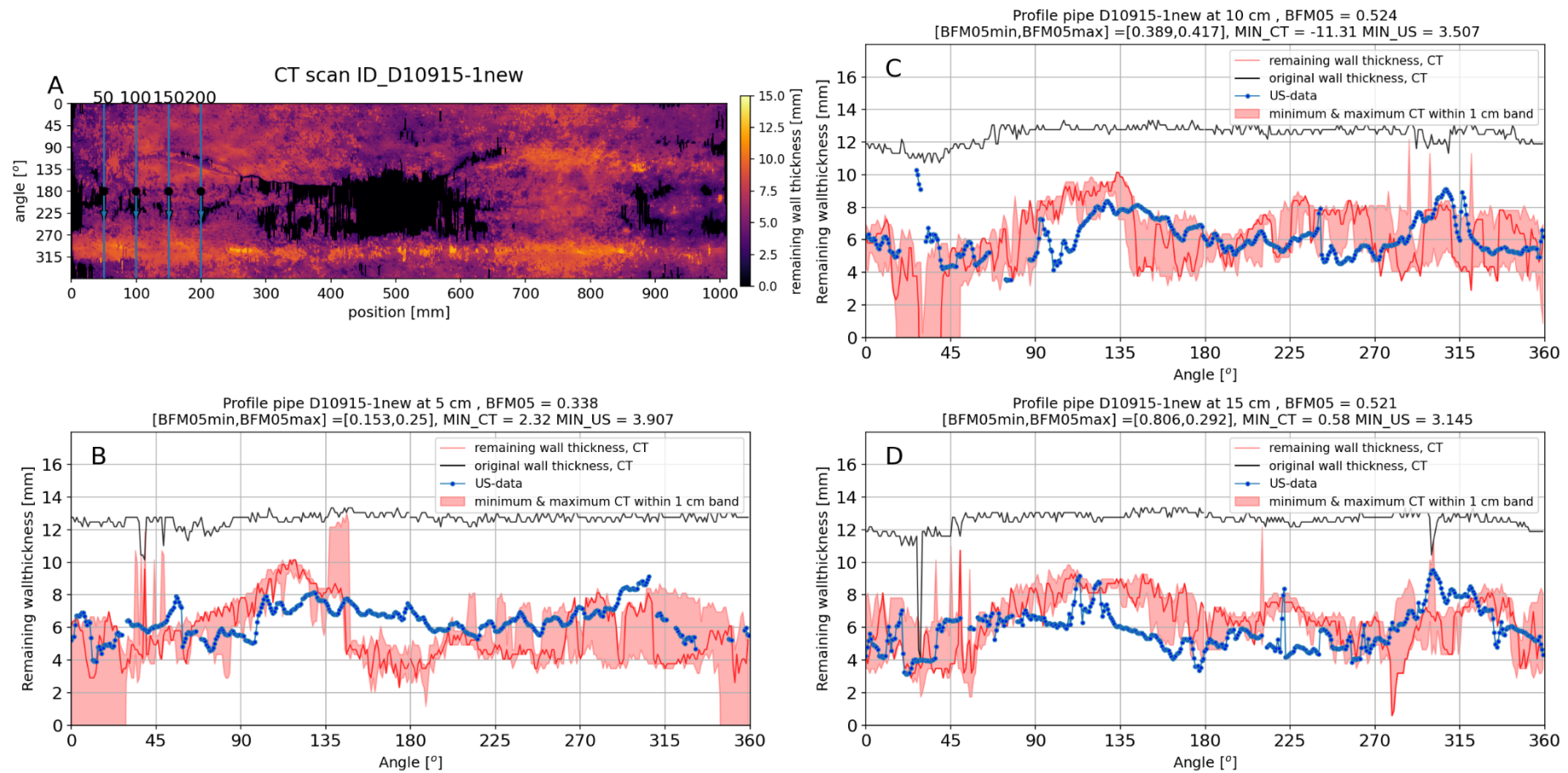




Figuur 18: In dit figuur worden de US-scans vergeleken met de CT-scan voor buis D09930. A) CT-scan van de buis met daarin de positie(s) van de US-scan(s) aangegeven met een blauwe verticale lijn. Het zwarte punt en de pijl op de lijn geven de startpositie en richting aan van het CT profiel, dit om te corrigeren voor de startpositie en richting van de US-data. B,C) US-data (blauw) vergeleken met CT-data (rood) op de betreffende positie. De bandbreedte in rood geeft het minimum en het maximum van 1cm bandbreedte (zie hoofdstekst). De originele wanddikte is weergegeven in zwart.

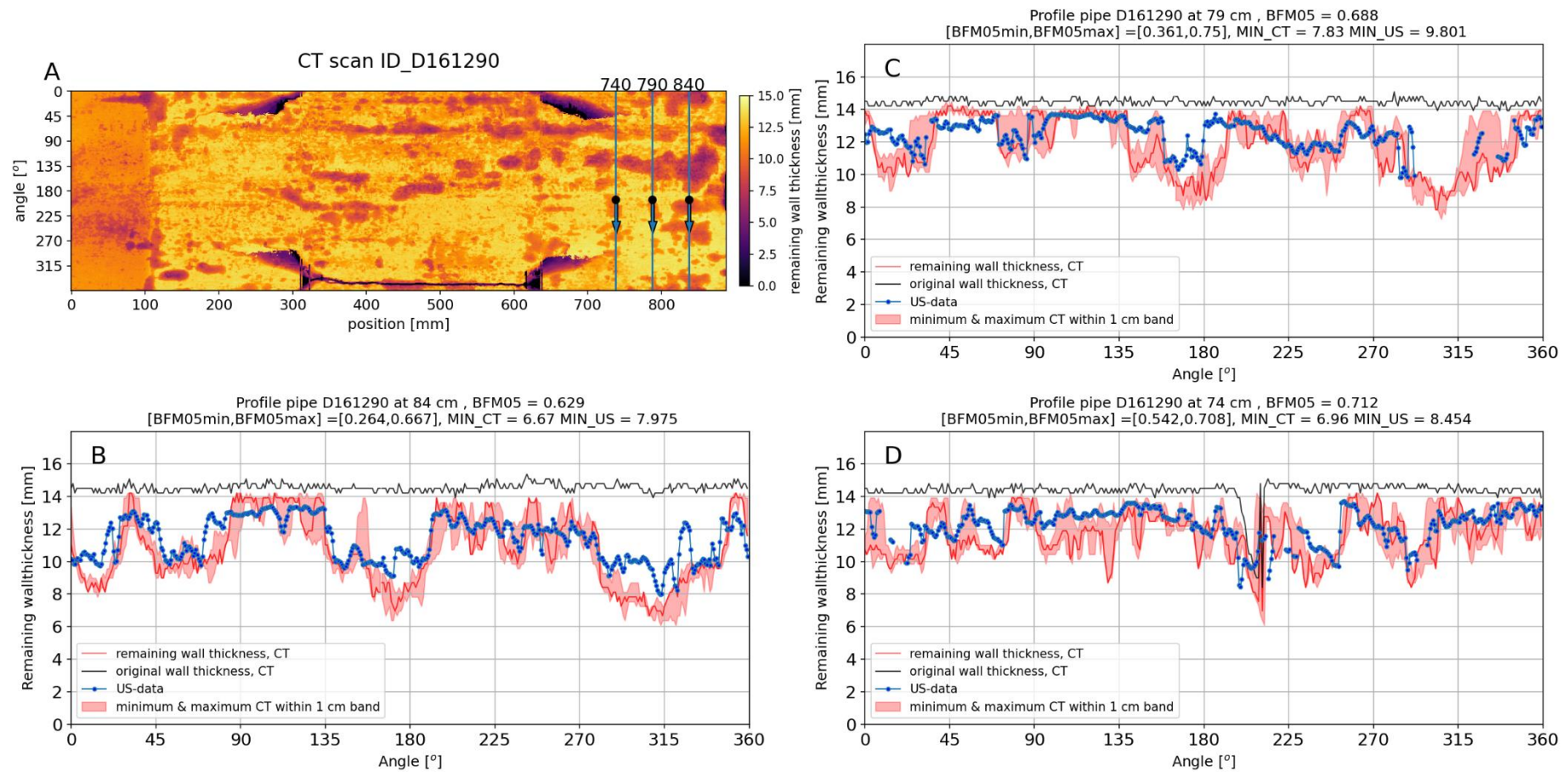


Figuur 19: In dit figuur worden de US-scans vergeleken met de CT-scan voor buis D10427-01. A) CT-scan van de buis met daarin de positie(s) van de US-scan(s) aangegeven met een blauwe verticale lijn. Het zwarte punt en de pijl op de lijn geven de startpositie en richting aan van het CT profiel, dit om te corrigeren voor de startpositie en richting van de US-data. B,C,D) US-data (blauw) vergeleken met CT-data (rood) op de betreffende positie. De bandbreedte in rood geeft het minimum en het maximum van 1cm bandbreedte (zie hoofdstekst). De originele wanddikte is weergegeven in zwart.

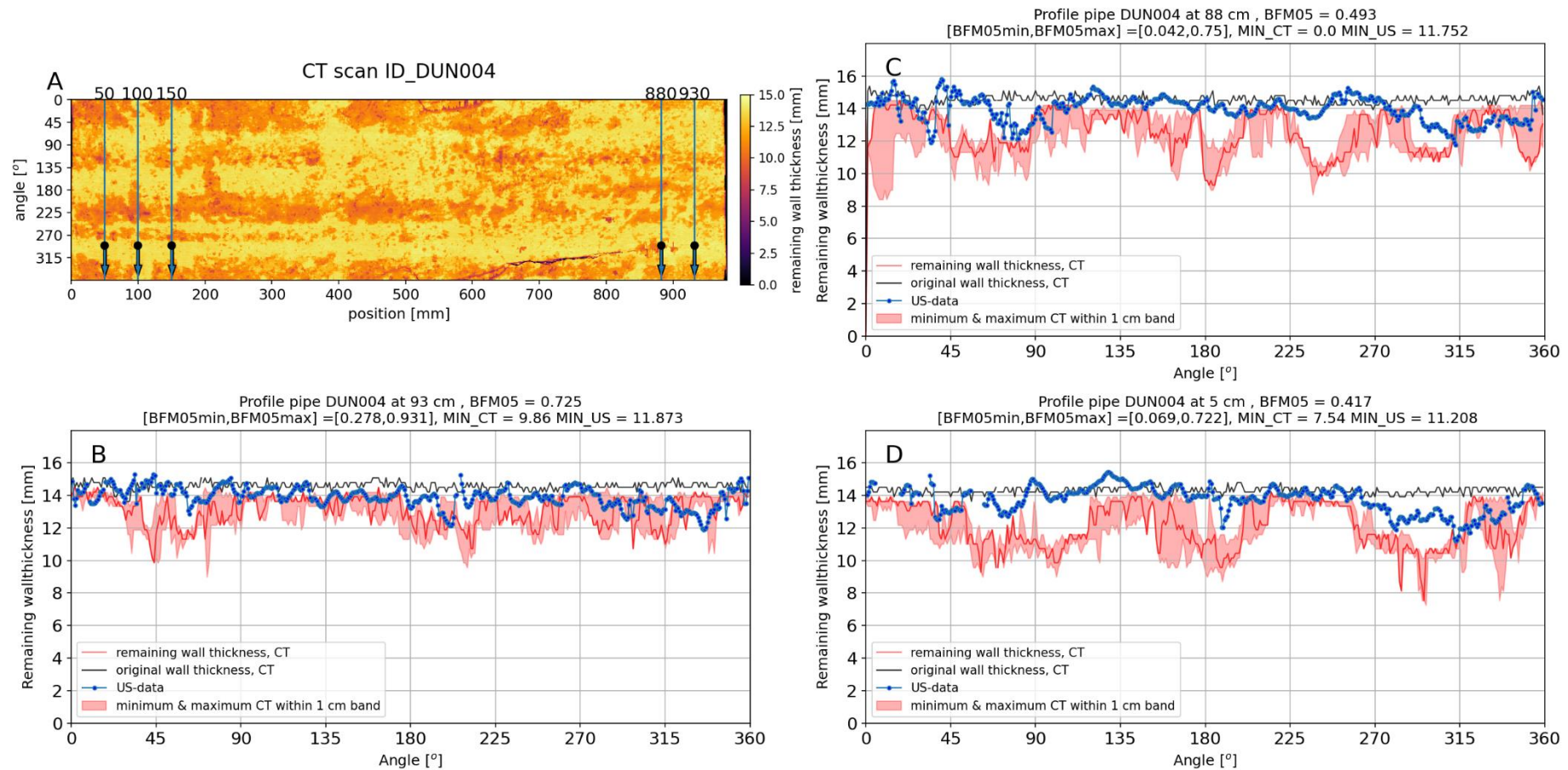


Figuur 20: In dit figuur worden de US-scans vergeleken met de CT-scan voor buis D10915-1new (deel 1). A) CT-scan van de buis met daarin de positie(s) van de US-scan(s) aangegeven met een blauwe verticale lijn. Het zwarte punt en de pijl op de lijn geven de startpositie en richting aan van het CT profiel, dit om te corrigeren voor de startpositie en richting van de US-data. B,C) US-data (blauw) vergeleken met CT-data (rood) op de betreffende positie. De bandbreedte in rood geeft het minimum en het maximum van 1cm bandbreedte (zie hoofdstekst). De originele wanddikte is weergegeven in zwart.



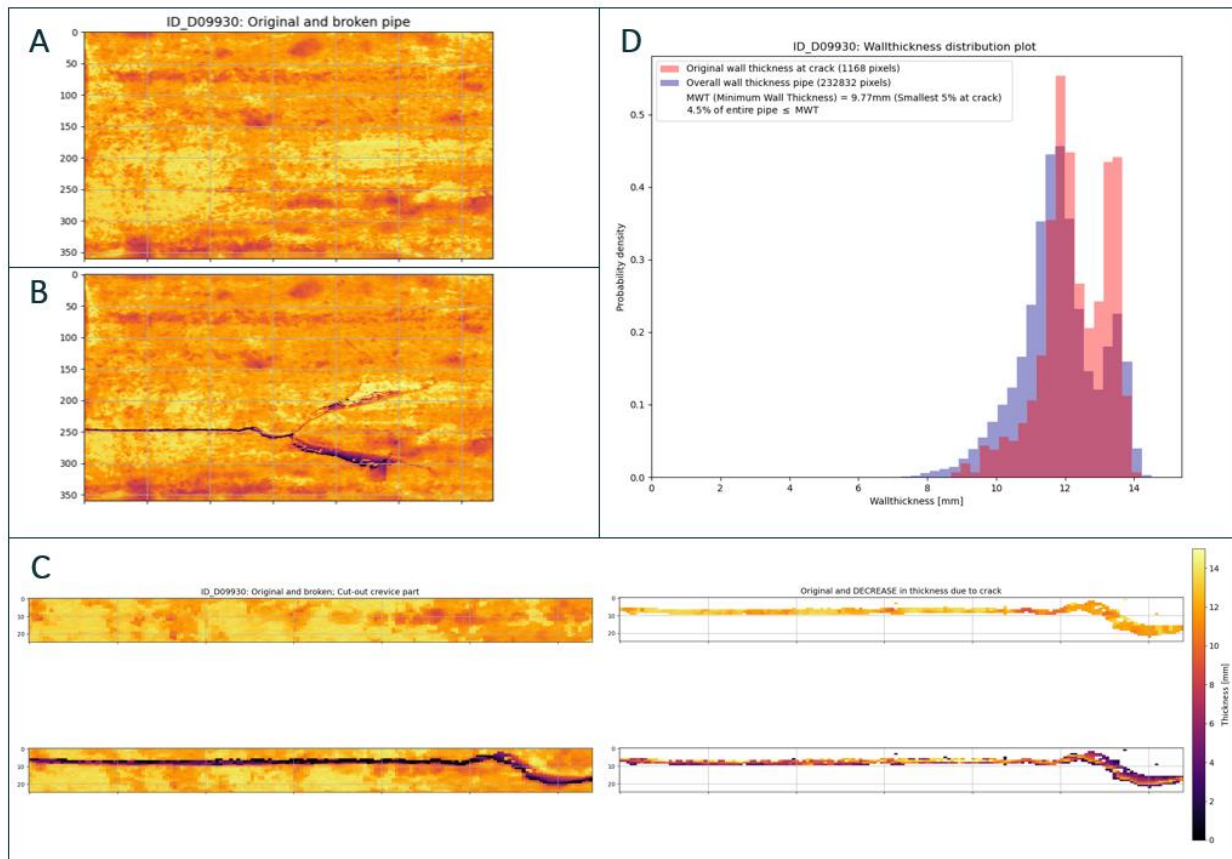


Figuur 21: In dit figuur worden de US-scans vergeleken met de CT-scan voor buis D161290. A) CT-scan van de buis met daarin de positie(s) van de US-scan(s) aangegeven met een blauwe verticale lijn. Het zwarte punt en de pijl op de lijn geven de startpositie en richting aan van het CT profiel, dit om te corrigeren voor de startpositie en richting van de US-data. B,C,D) US-data (blauw) vergeleken met CT-data (rood) op de betreffende positie. De bandbreedte in rood geeft het minimum en het maximum van 1cm bandbreedte (zie hoofdstekst). De originele wanddikte is weergegeven in zwart.

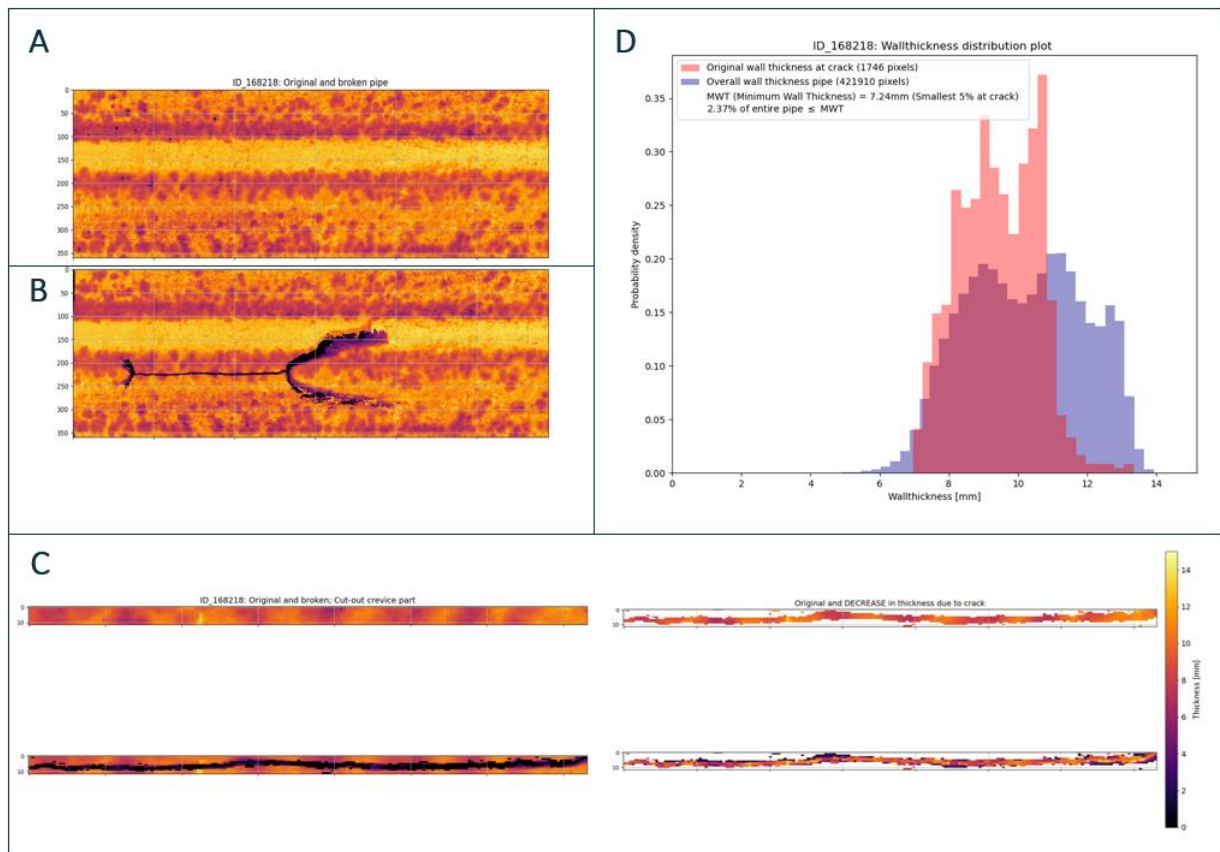


Figuur 22: In dit figuur worden de US-scans vergeleken met de CT-scan voor buis DUN004 (deel 1). A) CT-scan van de buis met daarin de positie(s) van de US-scan(s) aangegeven met een blauwe verticale lijn. Het zwarte punt en de pijl op de lijn geven de startpositie en richting aan van het CT profiel, dit om te corrigeren voor de startpositie en richting van de US-data. B,C,D) US-data (blauw) vergeleken met CT-data (rood) op de betreffende positie. De bandbreedte in rood geeft het minimum en het maximum van 1cm bandbreedte (zie hoofdstekst). De originele wanddikte is weergegeven in zwart.

### III Wanddikte profielen op de buis en scheur

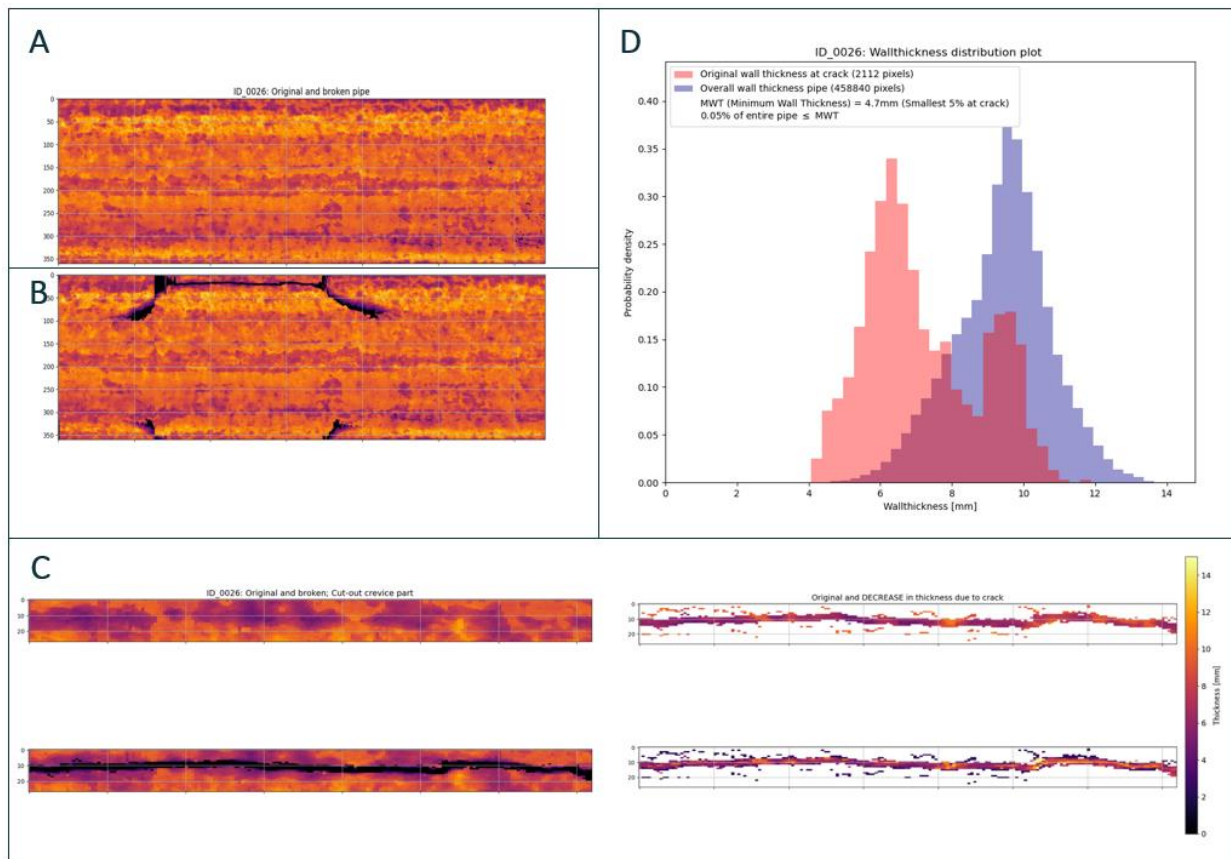


Figuur 23: In dit figuur wordt het identificeren van de minimum wanddikte van de scheur geïllustreerd voor buis D09930. A) CT-scan originele buis voorafgaand aan de breuk, B) CT-scan na het optreden van de breuk, C) selectie van het scheurgedeelte (links) en uitknippen van de scheur (rechtsboven) waarbij ook de wanddikteafname wordt weergegeven (rechtsonder), D) genormaliseerde histogrammen van de numerieke waarden die op de locatie van de scheur gevonden zijn voor de scheur daar is ontstaan (rood) en die op de gehele ongebroken buis gevonden zijn (blauw). Het minimum op de scheur is 9.77mm.



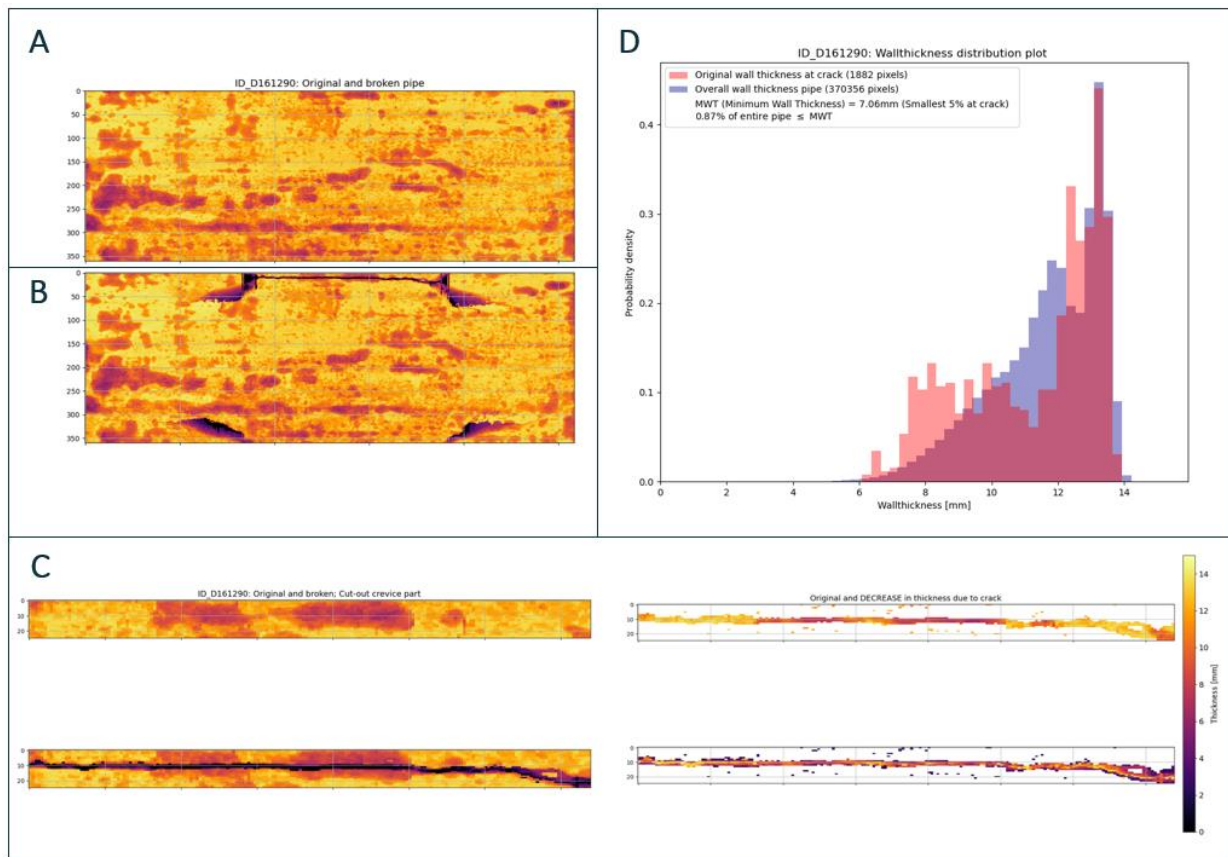
Figuur 24: In dit figuur wordt het identificeren van de minimum wanddikte van de scheur geïllustreerd voor buis 168218. A) CT-scan originele buis voor de breuk, B) CT-scan na de breuk, C) selectie van het scheur gedeelte (links) en uitknippen van de scheur (rechtsboven) waarbij ook de wanddikteafname wordt weergegeven (rechtsonder), D) genormaliseerde histogrammen van de numerieke waarden die op de locatie van de scheur gevonden zijn voor de scheur daar is ontstaan (rood) en die op de gehele ongebroken buis gevonden zijn (blauw). Het minimum op de scheur is genoteerd in de legenda: MWT (at crack) = 7.24mm.



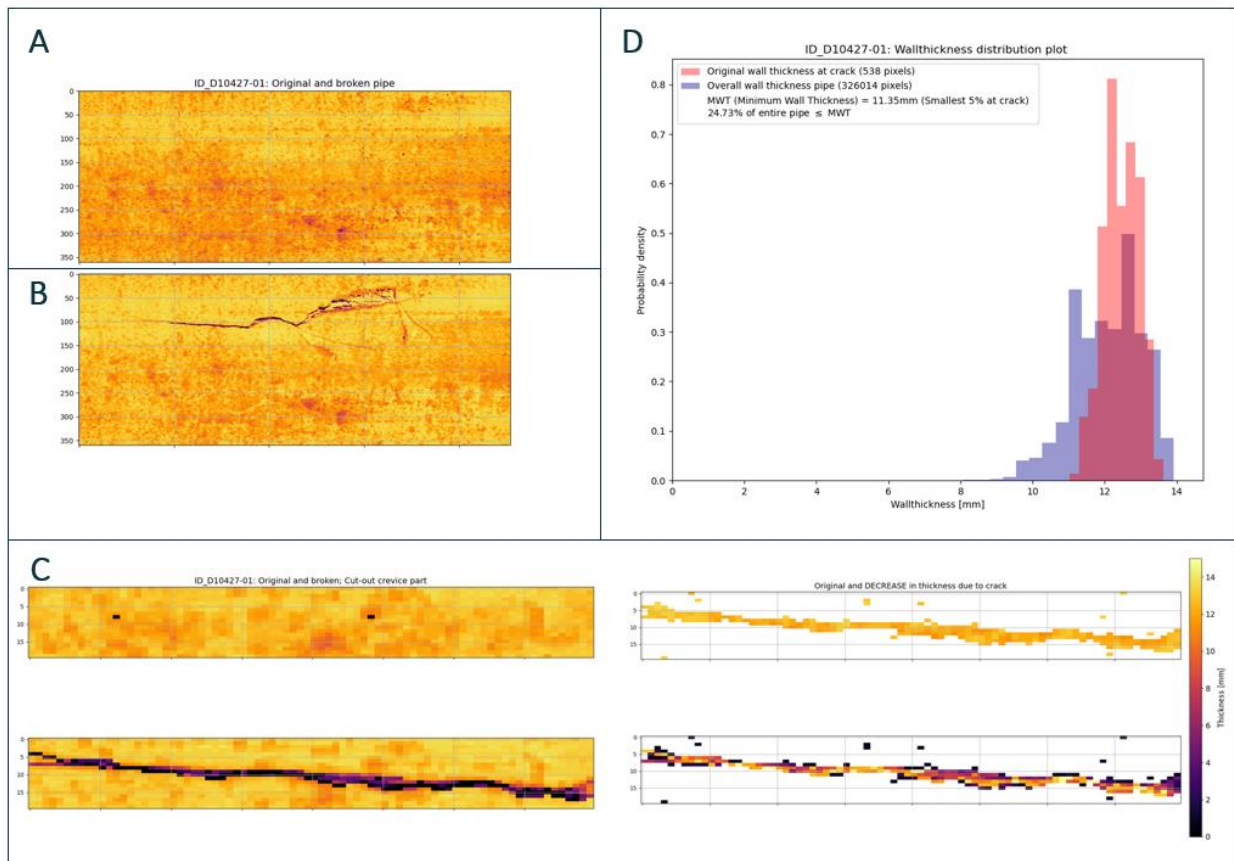


*Figuur 25: In dit figuur wordt het identificeren van de minimum wanddikte van de scheur geïllustreerd voor buis 0026. A) CT-scan originele buis voor de breuk, B) CT-scan na de breuk, C) selectie van het scheur gedeelte (links) en uitknippen van de scheur (rechtsboven) waarbij ook de wanddikteafname wordt weergegeven (rechtsonder), D) genormaliseerde histogrammen van de numerieke waarden die op de locatie van de scheur gevonden zijn voor de scheur daar is ontstaan (rood) en die op de gehele ongebroken buis gevonden zijn (blauw). Het minimum op de scheur is genoteerd in de legenda: MWT (at crack) = 4.7mm.*

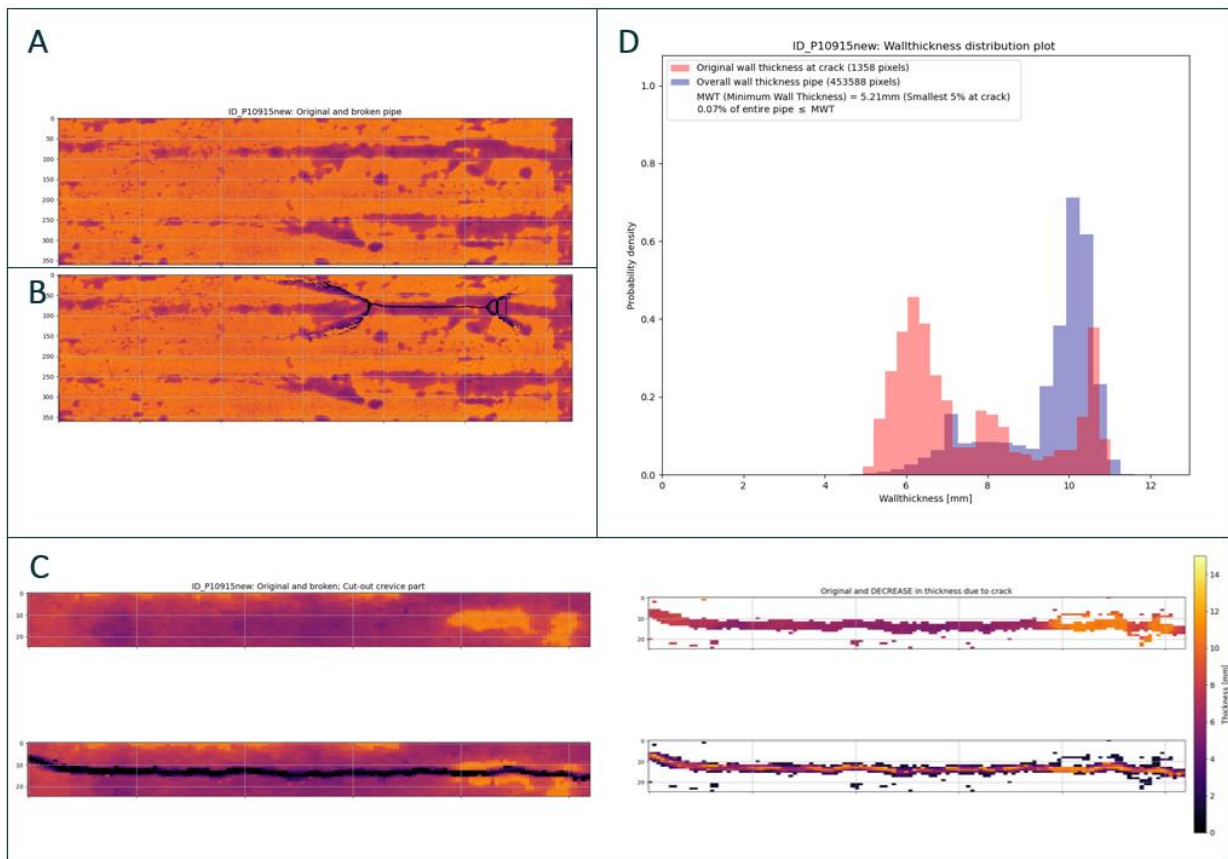




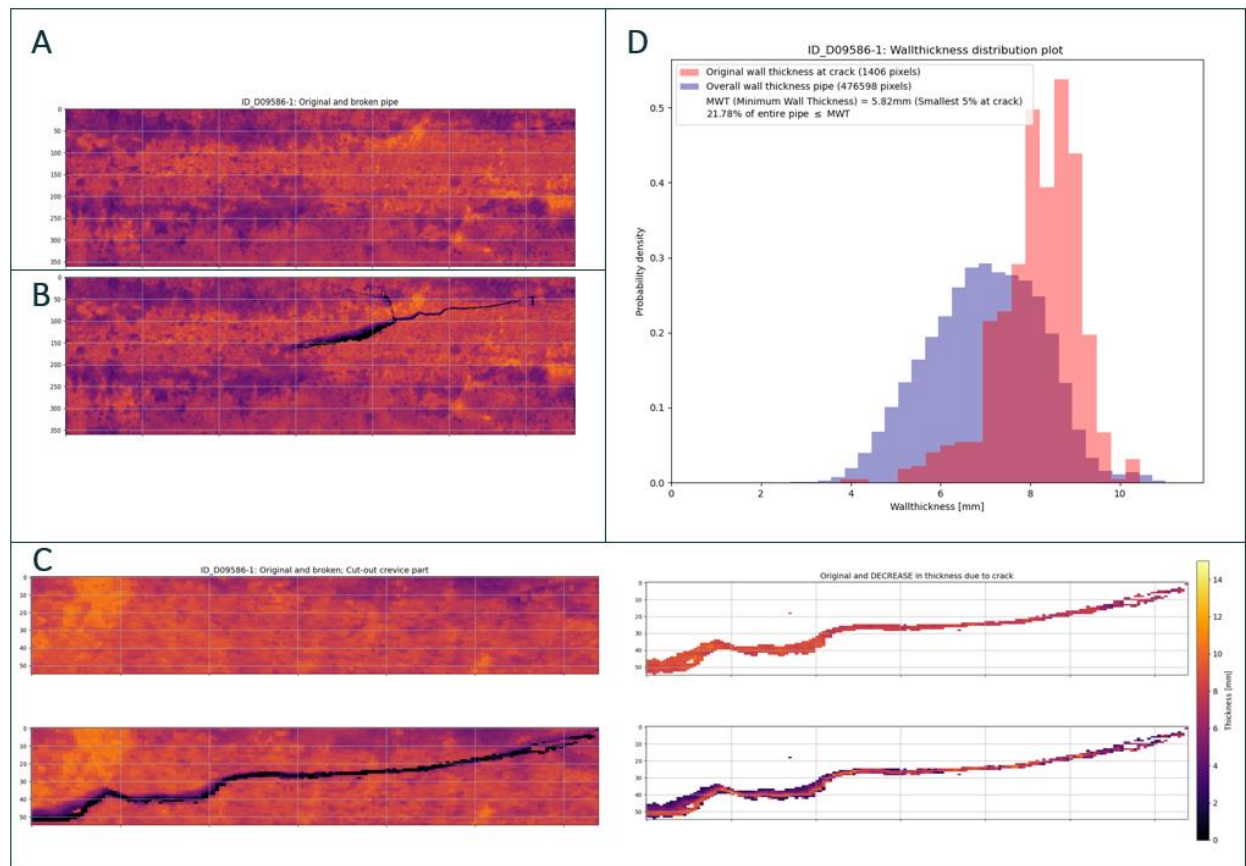
Figuur 26: In dit figuur wordt het identificeren van de minimum wanddikte van de scheur geïllustreerd voor buis D161290. A) CT-scan originele buis voor de breuk, B) CT-scan na de breuk, C) selectie van het scheur gedeelte (links) en uitknippen van de scheur (rechtsboven) waarbij ook de wanddikteafname wordt weergegeven (rechtsonder), D) genormaliseerde histogrammen van de numerieke waarden die op de locatie van de scheur gevonden zijn voor de scheur daar is ontstaan (rood) en die op de gehele ongebroken buis gevonden zijn (blauw). Het minimum op de scheur is genoteerd in de legenda: MWT (at crack) = 7.06mm.



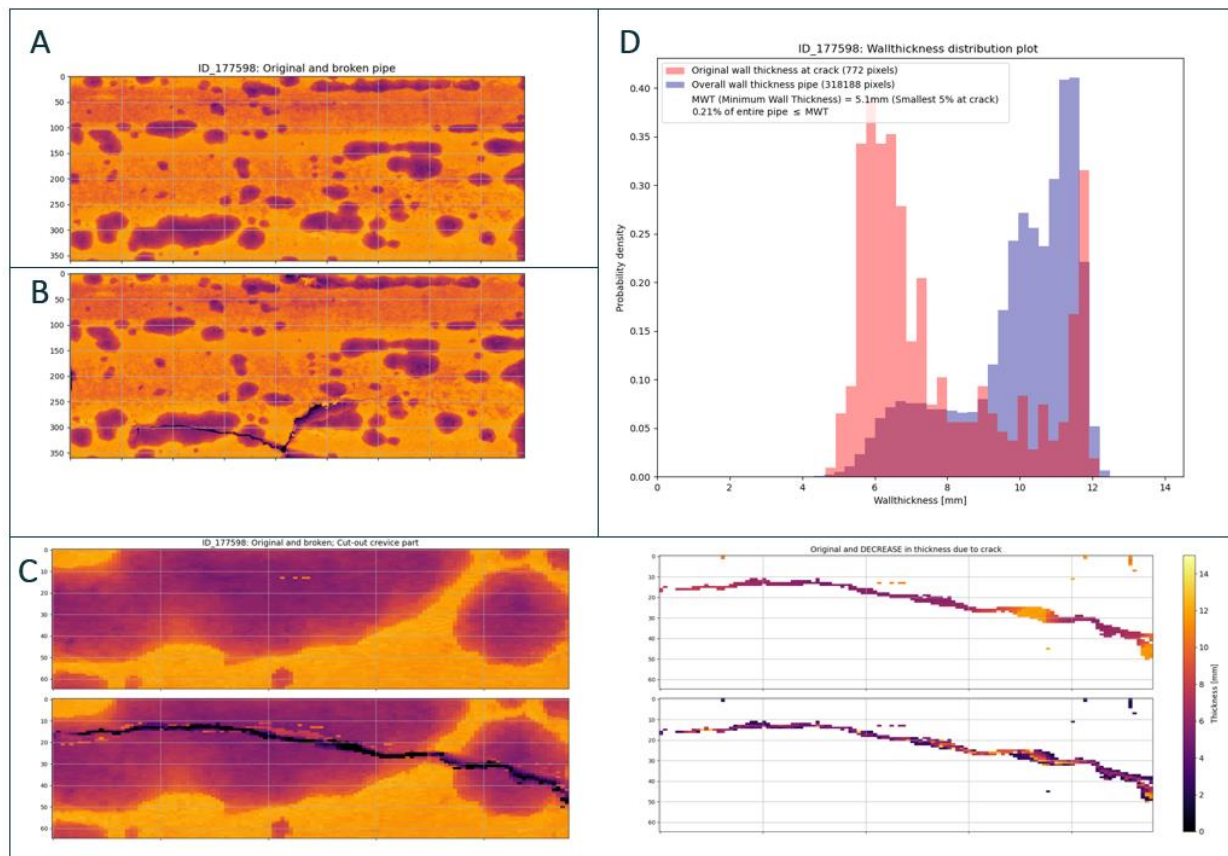
*Figuur 27: In dit figuur wordt het identificeren van de minimum wanddikte van de scheur geïllustreerd voor buis D10427-01. A) CT-scan originele buis voor de breuk, B) CT-scan na de breuk, C) selectie van het scheur gedeelte (links) en uitknippen van de scheur (rechtsboven) waarbij ook de wanddikteafname wordt weergegeven (rechtsonder), D) genormaliseerde histogrammen van de numerieke waarden die op de locatie van de scheur gevonden zijn voor de scheur daar is ontstaan (rood) en die op de gehele ongebroken buis gevonden zijn (blauw). Het minimum op de scheur is genoteerd in de legenda: MWT (at crack) = 11.35mm.*



Figuur 28: In dit figuur wordt het identificeren van de minimum wanddikte van de scheur geïllustreerd voor buis P10515new. A) CT-scan originele buis voor de breuk, B) CT-scan na de breuk, C) selectie van het scheur gedeelte (links) en uitknippen van de scheur (rechtsboven) waarbij ook de wanddikteafname wordt weergegeven (rechtsonder), D) genormaliseerde histogrammen van de numerieke waarden die op de locatie van de scheur gevonden zijn voor de scheur daar is ontstaan (rood) en die op de gehele ongebroken buis gevonden zijn (blauw). Het minimum op de scheur is genoteerd in de legenda: MWT (at crack) = 5.21mm.

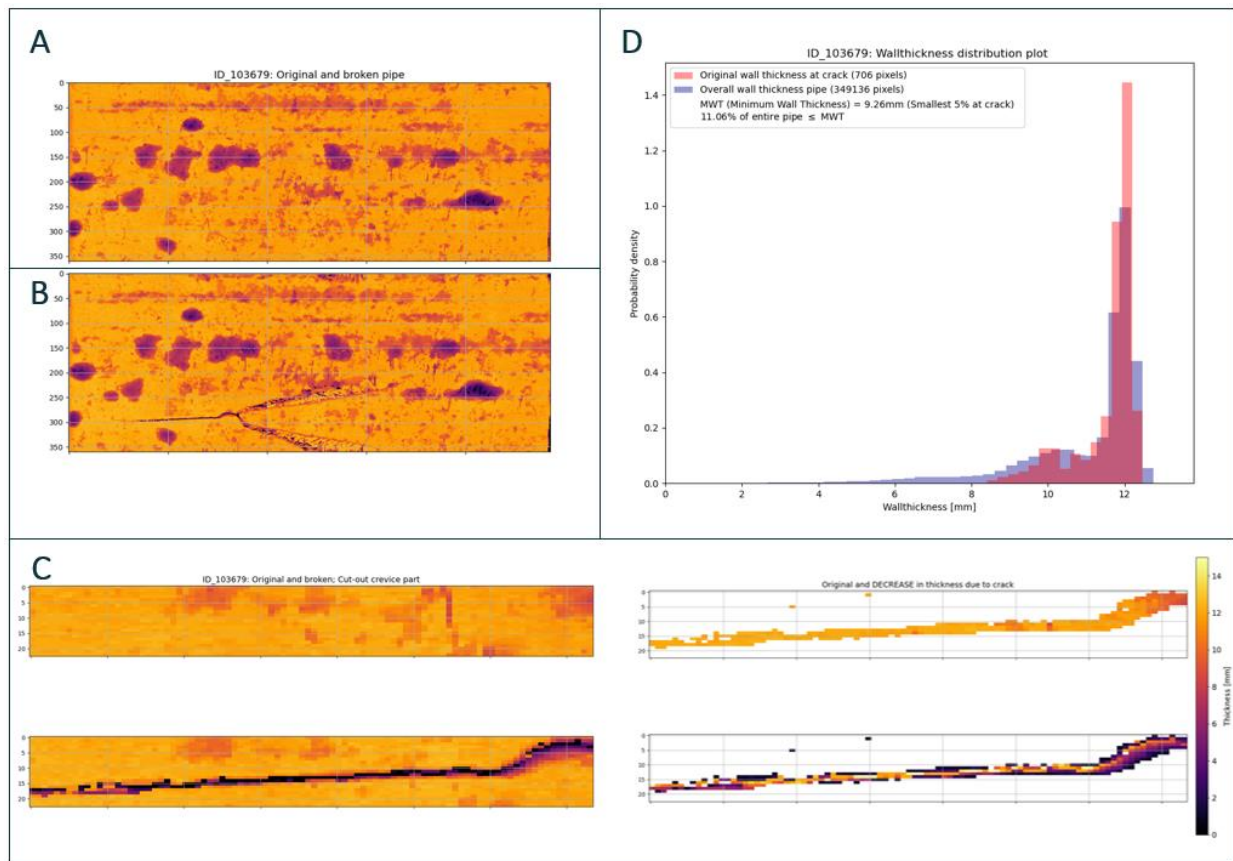


Figuur 29: In dit figuur wordt het identificeren van de minimum wanddikte van de scheur geïllustreerd voor buis D09586-1. A) CT-scan originele buis voor de breuk, B) CT-scan na de breuk, C) selectie van het scheur gedeelte (links) en uitknippen van de scheur (rechtsboven) waarbij ook de wanddikteafname wordt weergegeven (rechtsonder), D) genormaliseerde histogrammen van de numerieke waarden die op de locatie van de scheur gevonden zijn voor de scheur daar is ontstaan (rood) en die op de gehele ongebroken buis gevonden zijn (blauw). Het minimum op de scheur is genoteerd in de legenda: MWT (at crack) = 5.82mm.

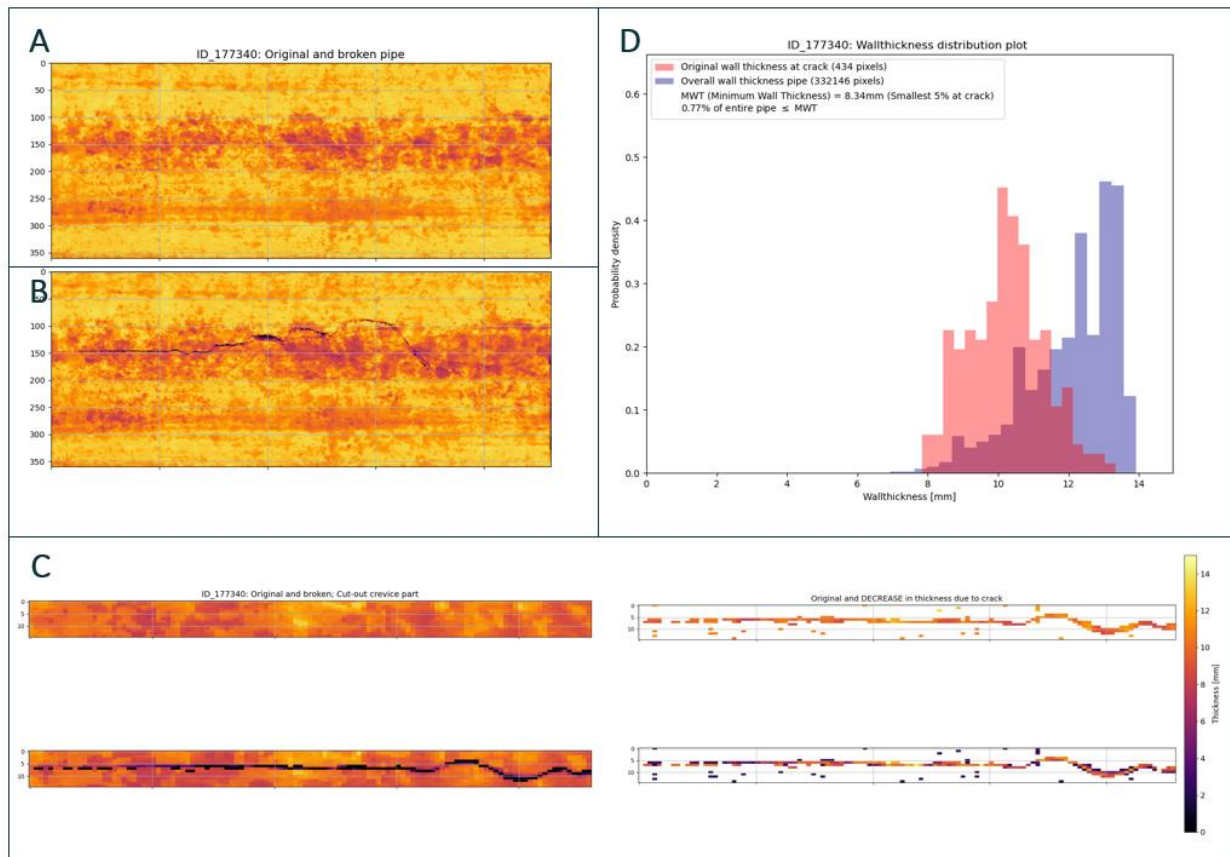


Figuur 30: In dit figuur wordt het identificeren van de minimum wanddikte van de scheur geïllustreerd voor buis 177598. A) CT-scan originele buis voor de breuk, B) CT-scan na de breuk, C) selectie van het scheur gedeelte (links) en uitknippen van de scheur (rechtsboven) waarbij ook de wanddikteafname wordt weergegeven (rechtsonder), D) genormaliseerde histogrammen van de numerieke waarden die op de locatie van de scheur gevonden zijn voor de scheur daar is ontstaan (rood) en die op de gehele ongebroken buis gevonden zijn (blauw). Het minimum op de scheur is genoteerd in de legenda: MWT (at crack) = 5.1mm.





*Figuur 31: In dit figuur wordt het identificeren van de minimum wanddikte van de scheur geïllustreerd voor buis 103679. A) CT-scan originele buis voor de breuk, B) CT-scan na de breuk, C) selectie van het scheur gedeelte (links) en uitknippen van de scheur (rechtsboven) waarbij ook de wanddikteafname wordt weergegeven (rechtsonder), D) genormaliseerde histogrammen van de numerieke waarden die op de locatie van de scheur gevonden zijn voor de scheur daar is ontstaan (rood) en die op de gehele ongebroken buis gevonden zijn (blauw). Het minimum op de scheur is genoteerd in de legenda: MWT (at crack) =9.26mm.*



Figuur 32: In dit figuur wordt het identificeren van de minimum wanddikte van de scheur geïllustreerd voor buis 177340. A) CT-scan originele buis voor de breuk, B) CT-scan na de breuk, C) selectie van het scheur gedeelte (links) en uitknippen van de scheur (rechtsboven) waarbij ook de wanddikteafname wordt weergegeven (rechtsonder), D) genormaliseerde histogrammen van de numerieke waarden die op de locatie van de scheur gevonden zijn voor de scheur daar is ontstaan (rood) en die op de gehele ongebroken buis gevonden zijn (blauw). Het minimum op de scheur is genoteerd in de legenda: MWT (at crack) = 8.34mm.