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 2021.032 | Augustus 2021

**Analyse
meetresultaten AC-
onderzoek Apeldoorn**

Bedrijfstakonderzoek

KWR

Bridging Science to Practice

Rapport

Analyse meetresultaten AC-onderzoek Apeldoorn

BTO 2021.032 | Augustus 2021

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

Opdrachtnummer

402045.212.001

Projectmanager

Ir. P.M. (Petra) Holzhaus

Opdrachtgever

BTO - Bedrijfsonderzoek

Auteur(s)

Ir. R.H.S. (Ralph) Beuken

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

Asbestcement, toestandsbepaling, exitbeoordelingen

Jaar van publicatie
2021

Meer informatie
Ir, Ralph Beuken
T +31306069649
E ralph.beuken@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

Augustus 2021 ©

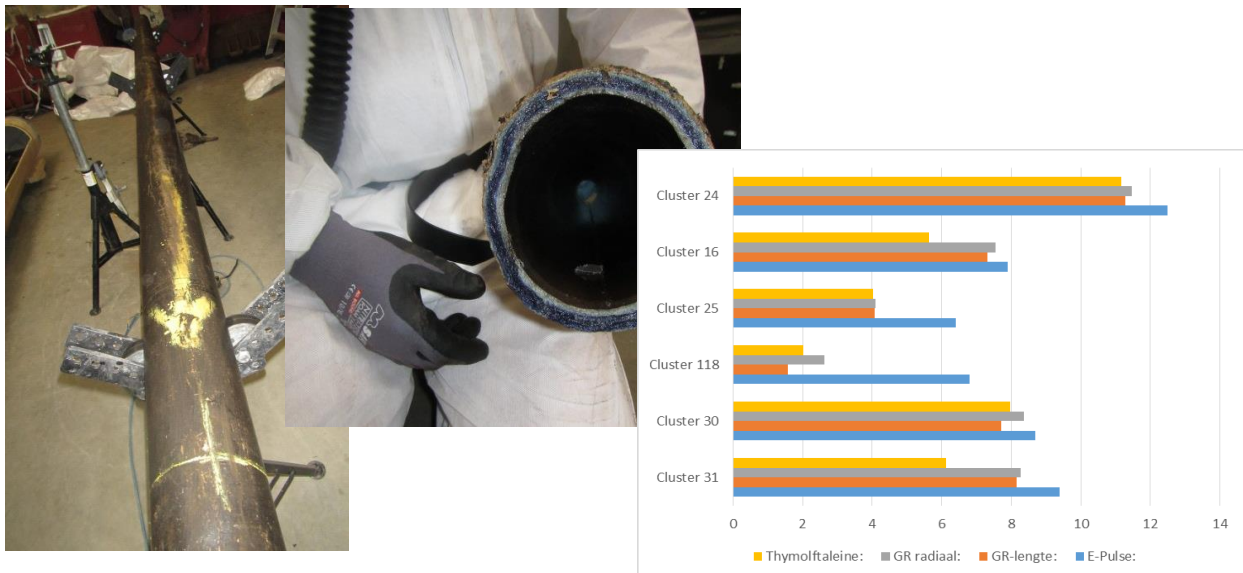
Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden vervoelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen,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

Managementsamenvatting

Georadar en ePulse bieden geen meerwaarde bij exitbeoordeling AC-leidingen

Auteur Ir R.H.S. (Ralph) Beuken.

Vitens heeft in Apeldoorn een groot vervangingsproject uitgevoerd van asbestcement (AC) leidingen, waarbij metingen zijn uitgevoerd om meer kennis te verkrijgen over de toestand van deze leidingen. Er is gemeten met ePulse, georadar en thymolftaleïne. Vitens heeft een eerste analyse van de data uitgevoerd en KWR gevraagd deze data opnieuw te analyseren. Deze analyse van de meetresultaten laat zien dat voor het verkrijgen van informatie uit uitgenomen leidingen (exitbeoordelingen) georadar geen meerwaarde levert boven thymolftaleïne. Daarnaast blijkt ePulse geen meerwaarde te bieden boven informatie die al beschikbaar is van storingen of expertkennis. De oorzaak dat georadar en ePulse minder geschikt zijn, is dat de uitloging van AC zeer inhomogeen is en dat beide technieken minder goed in staat zijn om voor een leiding de minimum en dus maatgevende wanddikte te identificeren. Omdat de uitloging moeilijk voorspelbaar is, is het niet mogelijk een betrouwbare uitspraak te doen over de restlevensduur op basis van bekende parameters zoals het jaar van aanleg of omgevingsfactoren. Dit betekent dat informatie over de toestand verkregen zal moeten worden uit registratie van opgetreden storingen en toestandsmetingen.



De meetopstelling voor georadar (links), een buis met thymolftaleïne, waarbij blauw het niet-uitgeloogde deel aangeeft van de leidingwand (midden) en de meetresultaten in mm voor de maatgevende effectieve wanddikte per leiding (rechts).

Belang: vervangen AC-leidingen onderbouwen

Drinkwaterbedrijven vervangen jaarlijks 0,5% van hun leidingnet en willen dat aandeel in de komende jaren verhogen naar 0,8%. Veel van deze vervangingen zal AC betreffen. Vitens had in 2020

nog circa 9000 km AC-leidingen. Een effectief vervangingsbeleid betekent dat de leidingen met de kortste restlevensduur als eerste worden vervangen. Hiervoor is kennis nodig over de actuele toestand

van de leidingen, hoe die verandert in de tijd en welke toestand minimaal nodig is.

Vitens heeft anno 2021 in Apeldoorn een groot deel van het AC-leidingnet vervangen, na een eerste selectie in 2018 waarbij 48 leidingen zijn onderzocht met de meettechniek ePulse. Van de uitgenomen leidingen is de toestand van vijf leidingen nauwkeurig gemeten met georadar (zowel in lengterichting als in omtrekriching) en met thymolftaleïne. Ook is ter vergelijking één buis onderzocht van een leiding die niet vervangen hoefde te worden. De metingen met ePulse zijn uitgevoerd door de firma Echologics en de metingen met georadar en thymolftaleïne door de firma M.J. Oomen.

Aanpak: meetresultaten geanalyseerd van 142 AC-buizen

De resultaten zijn eerst door Vitens geanalyseerd. Aan KWR is gevraagd de meetresultaten nogmaals te analyseren. Hiervoor zijn de meetmethoden beschreven en in samenhang geplaatst met eerder onderzoek. Van de zes onderzochte leidingen is alle meetdata geanalyseerd en in samenhang beschreven om te achterhalen wat de meerwaarde is van de verschillende meettechnieken voor Vitens en op welke wijze Vitens lessen kan trekken uit de meetactiviteiten.

Resultaten: georadar en ePulse geen meerwaarde boven thymolftaleïne

De analyse van de data liet voornamelijk het volgende zien:

- De gemiddelde uitloging gemeten met georadar en thymolftaleïne komt vrij goed overeen. De gemiddelde uitloging met georadar in de radiaalrichting is hoger dan de gemiddelde uitloging gemeten met georadar in de lengterichting, die weer hoger is dan de gemiddelde uitloging met thymolftaleïne.
- De uitloging is zeer inhomogeen, wat betekent dat de maatgevende minimum wanddikte alleen gevonden kan worden bij voldoende nauwkeurigheid en meetdichtheid van de meting.

- Georadar-metingen worden met de hoogste dichtheid uitgevoerd.
- Bij twee van de zes leidingen blijkt dat thymolftaleïnemetingen een minimum wanddikte meten die aanzienlijk lager is dan die gemeten met georadar.
- Gegeven de onderschatting van georadar en het onvoldoende meten van maatgevende minimum wanddikte heeft het meten van exitbeoordelingen met georadar geen meerwaarde heeft boven thymolftaleïne.
- De ePulse techniek is met oog op de nauwkeurigheid en de dichtheid van de meting onvoldoende betrouwbaar voor de identificatie van te vervangen leidingen en biedt geen aantoonbaar voordeel op informatie verkregen uit storingsmeldingen of expertkennis.
- De gemeten wanddikte van de AC-buizen kent een grote variatie.
- De vijf leidingen die Vitens heeft vervangen laten grote verschillen zien in de mate van uitloging, waarbij de twee oudste leidingen de langste restlevensduur hebben. Dat wil zeggen dat selectie op jaar van aanleg geen garantie is voor de meest kostenefficiënte vervangingsbeslissing.

Toepassing: voorspelling restlevensduur AC-leidingen alleen mogelijk met metingen

De zes onderzochte leidingen laten een inhomogene uitloging zien en als gevolg daarvan een grote variatie van de effectieve wanddikte. Dit wordt tevens veroorzaakt door een onregelmatige wanddikte. Dit houdt in dat het niet mogelijk is een betrouwbare voorspelling te doen van de restlevensduur op basis van bekende parameters zoals het jaar van aanleg of omgevingsfactoren. Hiervoor zal informatie noodzakelijk zijn afkomstig van opgetreden storingen of ter plekke uitgevoerde metingen.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Second opinion AC-onderzoek Apeldoorn* (BTO 2021.032).

Inhoud

Rapport	2
<i>Managementsamenvatting</i>	3
Inhoud	5
1 Inleiding	7
2 Achtergrond bij veroudering en toestandsbepaling van AC	8
2.1 AC-leidingen en veroudering	8
2.2 Toegepaste toestandsbepalingstechnieken	9
2.2.1 Thymolftaleïne	9
2.2.2 Georadar	9
2.2.3 ePulse	9
2.3 Eerder onderzoek waarin toestandsbepalingstechnieken zijn vergeleken	9
2.4 Voorafgaande beschouwing over de beoordeling van meetmethoden	10
3 AC-leidingen in Apeldoorn en uitgevoerde werkzaamheden door Vitens	12
3.1 Beschrijving AC-leidingen in Apeldoorn	12
3.2 Metingen met ePulse	12
3.3 Metingen met georadar en thymolftaleïne	13
4 Meetresultaten thymolftaleïne en georadar	15
4.1 Wanddikte	15
4.2 Metingen met georadar en thymolftaleïne	16
4.2.1 Cluster 31, Haringvliet	16
4.2.2 Cluster 30, Vechtstraat	19
4.2.3 Cluster 118, Wendenlaan	22
4.2.4 Cluster 25, Duivenlaan	25
4.2.5 Cluster 16, Morellenlaan	28
4.2.6 Cluster 24, Raadsherenveld	31
4.3 Overige vergelijkingen van meetwaarden	34
5 Discussie	36
5.1 Bespreking van de meetmethoden en resultaten	36
5.2 Exitbeoordelingen, nuttig of niet?	38
5.3 Toepassing van meetresultaten voor selectie van leidingen voor vervanging	39

5.4	Toepassing van resultaten voor langetermijn prognosemodellen	41
6	Conclusies en aanbevelingen	43
7	Literatuur	45
I	Metingen ePulse	46
II	Protocol uitnemen en beproeven buizen	47
III	Thymolftaleïnetesten – controle outliers	48

1 Inleiding

Het leidingnet van Vitens beslaat ca 50.000 km, waarvan 18% bestaat uit AC. Vitens wil de komende jaren een groot deel van deze leidingen vervangen. Door inzicht in de degradatiemechanismen van deze leidingen, kan Vitens die leidingen selecteren die als eerste moeten worden vervangen en zo het aantal storingen beperken en investeringen effectief aan te wenden.

Om een beter inzicht te krijgen in deze degradatiemechanismen en om te weten welke meetmethoden hiervoor het meest geschikt zijn, heeft Vitens het project 'Vergelijkend onderzoek restwanddiktemeetmethodieken AC-cohorten' uitgevoerd, waarvan de resultaten zijn weergegeven in het rapport met dezelfde titel (Kraaijvanger, 2019). Dit project was mogelijk door de grootschalige sanering van AC-leidingen in Apeldoorn. Voor dit project stelde Vitens de volgende doelen:

- meer inzicht verkrijgen in de degradatie van de buiswand van AC-leidingen op niveau van cohorten (bepaald door diameter en productiejaar);
- drie methoden voor de restwanddiktebepaling valideren en vergelijken, te weten: ePulsemeting (uitgevoerd door Echologics), georadarmeting (uitgevoerd door Oomen) en de thymolftaleïne-test (uitgevoerd door Vitens en/of aannemers);
- input verzamelen voor het PRP-model (het door Vitens gebruikte softwarepakket voor ondersteuning van saneringsbeslissingen).

Vitens heeft 48 leidingdelen laten onderzoeken met ePulse, waarna 6 leidingen met een diameter van 100 mm zijn geselecteerd voor toepassing van de twee andere meettechnieken. Voor de selectie van deze leidingen is uitgegaan van twee leidingen met een relatief beperkte restwanddikte zoals gemeten met ePulse, drie leidingen met een relatief gemiddelde restwanddikte en één leiding (bestaande uit slechts 1 buis) met een relatief grote restwanddikte.

Nadat de buizen zijn uitgenomen, zijn deze voor verdere beproeving vervoerd naar een door Vitens speciaal ingerichte en afgesloten ruimte. Hier zijn georadarmetingen uitgevoerd aan de buitenzijde van de leiding op vier klokstanden in de lengterichting en op één willekeurig gekozen positie in de omtrekriching. Op de locatie waar de omtrekmeting is uitgevoerd, is de buis geknipt en is op het verse breukvlak thymolftaleïne aangebracht, waarna op vier klokstanden metingen zijn uitgevoerd. De resultaten van deze metingen zijn door Vitens beschreven (Kraaijvanger, 2019). Vitens wil de resultaten meer uitvoerig besproken hebben en in samenhang bezien met eerder uitgevoerd onderzoek over toestandsbepalingen op AC-leidingen. Het voorliggende project betreft een second opinion van de metingen en een analyse naar eventuele aanvullende informatie.

Dit onderzoek is begeleid door medewerkers van Vitens, te weten Eelco Trietsch, Bart Jacobs en Jan Pot.

In dit rapport is in hoofdstuk 2 achtergrondinformatie beschreven over de veroudering van AC en over de gebruikte inspectietechnieken. In hoofdstuk 3 is korte beschrijving gegeven van het distributienet in Apeldoorn en de wijze waarop de metingen hebben plaatsgevonden. De analyseresultaten van de zes leidingclusters zijn beschreven in hoofdstuk 4. In Hoofdstuk 5 zijn de meetresultaten bediscussieerd en conclusies en aanbevelingen zijn opgenomen in hoofdstuk 6.

2 Achtergrond bij veroudering en toestandsbepaling van AC

2.1 AC-leidingen en veroudering

Het Nederlandse leidingnet heeft een totale lengte van 120.000 en bestaat voor 29.800 km uit AC (Vewin, 2017). Door het vervangen van leidingen neemt dit steeds verder af. In 2012 bedroeg de totale lengte 32.500 km (Vewin, 2012), wat neerkomt op een vervanging van gemiddeld 540 km per jaar (circa 0,45%). De verwachting is dat de drinkwaterbedrijven de komende jaren een groter aandeel AC-leidingen gaan vervangen. In de Prestatievergelijking die de Inspectie Leefomgeving en Infrastructuur driejaarlijks uitvoert, is opgenomen dat in de periode 2013-2019 de bedrijven jaarlijks 0,7% van het leidingnet hebben vervangen, bestaande uit 0,5% saneringen en 0,2% reconstructies (Inspectie Leefomgeving en Transport, 2020). Drinkwaterbedrijven verwachten dat het aandeel saneringen in de periode 2020-2030 0,8% zal bedragen. Het is de verwachting dat in de toekomst een groot deel van de vervangingen uit AC zal bestaan, aangezien in deze leidingen de meeste storingen optreden (Mesman et al., 2016) en veel van deze leidingen in wijken uit de jaren zestig, zeventig en tachtig liggen die de komende jaren grootschalig gerenoveerd zullen worden.

Om binnen deze groep te vervangen AC-leidingen de juiste prioriteiten te stellen is er behoefte aan informatie over de toestand¹. Dit kan door het analyseren van storingen, om vervolgens die leidingtypen te selecteren waar de meeste storingen optreden. Een andere werkwijze is de toestand te meten, wat op twee manieren kan worden uitgevoerd, namelijk op leidingen die nog in bedrijf zijn of op (delen van) leidingen die beschikbaar komen door reparaties of sanering, de zogenaamde exitbeoordelingen. Toestandsmetingen op leidingen die in bedrijf zijn vergen in de regel hoge uitvoeringskosten en is momenteel slechts beschikbaar voor grotere diameters (groter dan 250 mm). De ePulse-techniek is een relatief goedkope techniek om een schatting te maken van de toestand van leidingen die in bedrijf zijn en is beschikbaar voor alle diameters en voor leidingen die niet vervaardigd zijn van kunststof. Bij werkzaamheden komen buizen beschikbaar waarbij het mogelijk is voor alle diameters en tegen geringe kosten destructieve of non-destructieve toestandsbepaling toe te passen. De informatie die uit deze exitbeoordelingen beschikbaar komt, kan in principe gebruikt worden om de toestand van vergelijkbare buizen te voorspellen. Onderzoek in de laatste jaren heeft echter aangetoond dat de variatie van de uitloging dusdanig groot is dat een betrouwbare voorspelling moeilijk valt te maken.

Voor AC-buizen zijn de volgende faalmechanismen van belang.

1. Uitloging wordt algemeen gezien als het dominante degradatiemechanisme voor AC (Slaats en Mesman, 2004). Hierbij lost calciumhydroxide op uit een gedeelte van de buiswand dat daardoor zijn strekte verliest. Hierbij geldt dat de sterkte van het uitgeloopte deel verwaarloosbaar is ten opzichte van die van het niet-uitgeloopte deel. Uitloging aan de binnenzijde van de buiswand (inwendige uitloging) kan optreden als gevolg van aantasting door het drinkwater en wordt gerelateerd aan de SI. Uitloging aan de buitenzijde (uitwendige uitloging) kan optreden als gevolg van aantasting door een zure bodem. De dikte van het niet-uitgeloopte deel wordt de effectieve wanddikte genoemd.
2. Met name in zettingsgevoelige bodems kunnen lekkages optreden als leidingen uit de mof worden getrokken of als hoekverdraaiing leidt tot hoge puntspanningen ter plaatse van de mof of de spie.

¹ Conform PCD 6 Conditiebepaling voor drinkwaterleidingen (Mesman et al., 2016) wordt het begrip toestand gehanteerd voor de meetbare technische staat van leidingen. Het begrip conditie wordt gehanteerd indien er sprake is van een vergelijking van de metingen met een benodigde normwaarde.

3. In leidingen die zijn aangelegd voor 1965 zijn natuurrubber afdichtingen toegepast die als gevolg van biologische processen kunnen degraderen.

De leidingen waarvan de toestand voor dit project is onderzocht zijn afkomstig uit Apeldoorn en zijn gelegen in een stabiele zandbodem. Van deze leidingen is bekend dat als gevolg van de waterkwaliteit inwendige uitloging veelvuldig optreedt en dat uitwendige uitloging beperkt is. Het is dan ook niet te verwachten dat falen als gevolg van zettingen een rol zal spelen. Tevens zijn er geen rapportages over natuurrubber ringen, waardoor kan worden aangenomen dat toestandsmetingen gericht op het meten van de uitloging een goed beeld geven van voor de toestand van leidingen.

2.2 Toegepaste toestandsbepalingstechnieken

De drie toegepaste toestandsbepalingstechnieken worden hieronder kort besproken.

2.2.1 Thymolftaleïne

De meting met thymolftaleïne is gebaseerd op de verkleuring van een indicator als gevolg van de pH op het buisoppervlak. Hiervoor dient thymolftaleïne aangebracht te worden op een vers breukvlak. Thymolftaleïne verkleurt van kleurloos bij $\text{pH} < 9.4$ naar blauw bij $\text{pH} > 10.6$. In die delen die blauw kleuren is kalk aanwezig en deze zijn niet uitgeloozd. De mate van uitloging is met een schuifmaat nauwkeurig te meten. Er kan een nauwkeurig onderscheid worden gemaakt tussen inwendige en uitwendige uitloging.

2.2.2 Georadar

De overgang tussen uitgeloozd en niet-uitgeloozd buismateriaal kan worden gemeten met georadar. De techniek is in eerste instantie ontwikkeld om de gelaagdheid van de bodem te meten en later is deze techniek toegepast op leidingen. Vandaar dat de term georadar in gebruik is. De meting kan inwendig worden uitgevoerd in een drooggezette leiding en uitwendig bij uitgenomen leidingen (exitbeoordelingen). De meting bij een uitgenomen leiding wordt over een lijn uitgevoerd in de lengterichting of in de radiaalrichting (omtrekrichting). De meting wordt uitgevoerd door de Firma Oomen (<https://www.mjoomen.nl/>). De waarden uit de meting betreffen de effectieve wanddikte, waarbij geen onderscheid gemaakt kan worden tussen de inwendige en uitwendige uitloging.

2.2.3 ePulse

ePulse is een akoestische techniek waarbij sensoren geluid opvangen dat wordt veroorzaakt door water dat door een brandkraan stroomt of door tikgeluiden. De voortplanting van geluid is afhankelijk van de stijfheid van de leiding. Doordat het materiaal en de diameter bekend zijn kan de stijfheid worden omgezet naar de effectieve wanddikte. Hiervoor moeten materiaaleigenschappen geschat worden zoals de elasticiteitsmodulus. Door het geluid van twee sensoren te vergelijken kan de gemiddelde effectieve wanddikte tussen deze sensoren worden bepaald. De meting wordt uitgevoerd door de firma Echologics (<https://www.echologics.com/>).

2.3 Eerder onderzoek waarin toestandsbepalingstechnieken zijn vergeleken

Binnen het BTO zijn de afgelopen jaren meerdere onderzoeken uitgevoerd waar de vergelijking tussen verschillende toestandsbepalingmethoden is uitgevoerd.

In 2004 heeft een evaluatie plaatsgevonden tussen metingen met fenolftaleïne² en met georadar (Mesman en van der Wielen, 2005). De georadartechniek was in die tijd nog in ontwikkeling en kon alleen worden toegepast op de buitenkant van leidingen die daarvoor ontgraven moesten worden. De validatie die Mesman en van der Wielen,

² Voor 2015 werd fenolftaleïne gebruikt als pH-indicator. De resultaten hiervan zijn vergelijkbaar met thymolftaleïne.

(2005) hebben uitgevoerd vertoont een slechte statistische overeenkomst. Een van de aanbevelingen was om de techniek verder te verbeteren en ook toepasbaar te maken voor in-line metingen.

In een 250 mm leiding van PWN in Middenmeer is in 2012 een vergelijking uitgevoerd tussen fenolftaleïne-testen, in-line georadar en ePulse (Beuken, et al., 2013). Er werden over een lengte van 500 meter georadarmetingen uitgevoerd, over 5 deeltrajecten werd een ePulse meting uitgevoerd en op twee punten werd een fenolftaleïne-test uitgevoerd. In deze leiding bleek dat de meetresultaten redelijk goed overeenkwamen. Opgemerkt wordt dat deze buis weinig was uitgelopen.

Van Laarhoven en van Summeren (2019) beschrijven de mogelijke toepassing van röntgentomografie (CT-scans) voor de toestandsmeting van AC-leidingen. Zij omschreven deze meetmethode als zeer compleet (de gehele buiswand omvattend) en nauwkeurig. Deze techniek is vervolgens vergeleken met metingen met thymolftaleïne en georadar. De resultaten van de thymolftaleïne-metingen leken goed overeen te komen met die verkregen met CT-scans. Lengteprofielen van CT-scans zijn vergeleken met dezelfde lengteprofielen gemeten met georadar. Hier bleek dat de georadartechniek de uitloging van buisdelen sterk onderschat, zowel bij homogene uitloging als bij inhomogeniteiten. Met name deze inhomogeniteiten, oftewel de plekken waar de grootste uitloging wordt gemeten, zijn bepalend voor de sterkte van de leiding als geheel.

2.4 Voorafgaande beschouwing over de beoordeling van meetmethoden

Voor het beoordelen van meetmethoden gelden twee eisen:

1. de meting moet voldoende nauwkeurig zijn om zekerheid te hebben dat de gemeten waarde overeenkomt met de daadwerkelijk toestand;
2. de meting moet voldoende meetdichtheid hebben om de maatgevende locatie, die met de laagste effectieve wanddikte, te detecteren.

Met oog op de nauwkeurigheid van de toegepaste meetmethoden, geldt het volgende.

1. Thymolftaleïne is het meest betrouwbaar aangezien die delen die sterkte bezitten chemisch goed zijn te onderscheiden met een dergelijke pH-indicator. Dit wordt bevestigd door vergelijkende metingen met CT-scans, zie ook van Laarhoven en van Summeren (2019). Ook worden metingen met pH-indicatoren in internationale literatuur als betrouwbaar genoemd (zie ook Beuken en van Laarhoven, 2019). De mate van uitloging kan met een schuifmaat, of eventueel met een rolmaat, nauwkeurig worden vastgesteld. Er zijn echter meerdere handmatige acties noodzakelijk (meetpositie selecteren, opname metingen, noteren) die kansen op fouten mogelijk maken.
2. Georadar meet overgangen tussen uitgelopen materiaal en niet-uitgelopen materiaal. Er kan daarbij geen onderscheid worden gemaakt tussen inwendige en uitwendige uitloging, de meting betreft daarom de effectieve wanddikte. De nauwkeurigheid is afhankelijk van een correcte meting en interpretatie van de weerkaatsingspatronen van de radarsensor. Van Laarhoven en van Summeren (2019) constateerden dat de georadartechniek de uitloging van buisdelen sterk onderschat. Zij zagen aanwijzingen dat vlekken van inhomogene uitloging gemist werden, wat direct effect heeft op de maatgevende minimum effectieve wanddikte. Ook bleek dat homogene uitloging systematisch werd onderschat. Dit maakt dat de georadartechniek als minder nauwkeurig kan worden verondersteld dan thymolftaleïne.
3. ePulse meet verschillen in geluidspatronen, die worden omgezet naar een gemiddelde effectieve wanddikte. Voor deze omzetting worden aannamen gehanteerd over onder andere de elasticiteitsmodulus van het leidingmateriaal. Omdat er geen toegang wordt verkregen tot het buismateriaal, zal de nominale wanddikte worden gebruikt, die in de praktijk vaak een onderschatting is van de oorspronkelijke wanddikte. Op basis van deze motivatie kan ePulse worden beschouwd als de minst nauwkeurige meettechniek. Er hoeft echter geen buis te worden uitgenomen.

Met oog op de meetdichtheid geldt dat die van georadar het hoogste is, met die kanttekening dat de metingen op een lijn worden uitgevoerd. In de lengterichting is dit op 4 klokstanden, wat betekent dat de meetdichtheid daartussen nul is. In de radiaalrichting geldt dat voor alle metingen tussen de meetradialen. De meetdichtheid van thymolftaleïne is aanzienlijk lager omdat in dit onderzoek maar 4 metingen per buis worden uitgevoerd. De meetdichtheid van ePulse met één meting per leiding is het laagst. Hoewel de meetdichtheid van ePulse het laagst is, kan wel gesteld worden het geen puntmeting betreft. Het meetresultaat geldt voor de volledige lengte.

3 AC-leidingen in Apeldoorn en uitgevoerde werkzaamheden door Vitens

3.1 Beschrijving AC-leidingen in Apeldoorn

Het drinkwaterleidingnet van de stad Apeldoorn beslaat in totaal uit circa 1000 km en bestaat voor 326 km (30%) uit AC (gegevens Vitens verkregen op 80-9-2020). In Tabel 1 is een overzicht gegeven van de periode van aanleg en de diameters van de aanwezige AC-leidingen. De AC-leidingen zijn aangelegd in de zestiger en zeventiger jaren. Ongeveer 2/3^{de} heeft een diameter binnen de range 100-149 mm, dit betreffen in vrijwel alle gevallen diameters van 100 mm.

Tabel 1 Lengtes van AC-leidingen in Apeldoorn (km)

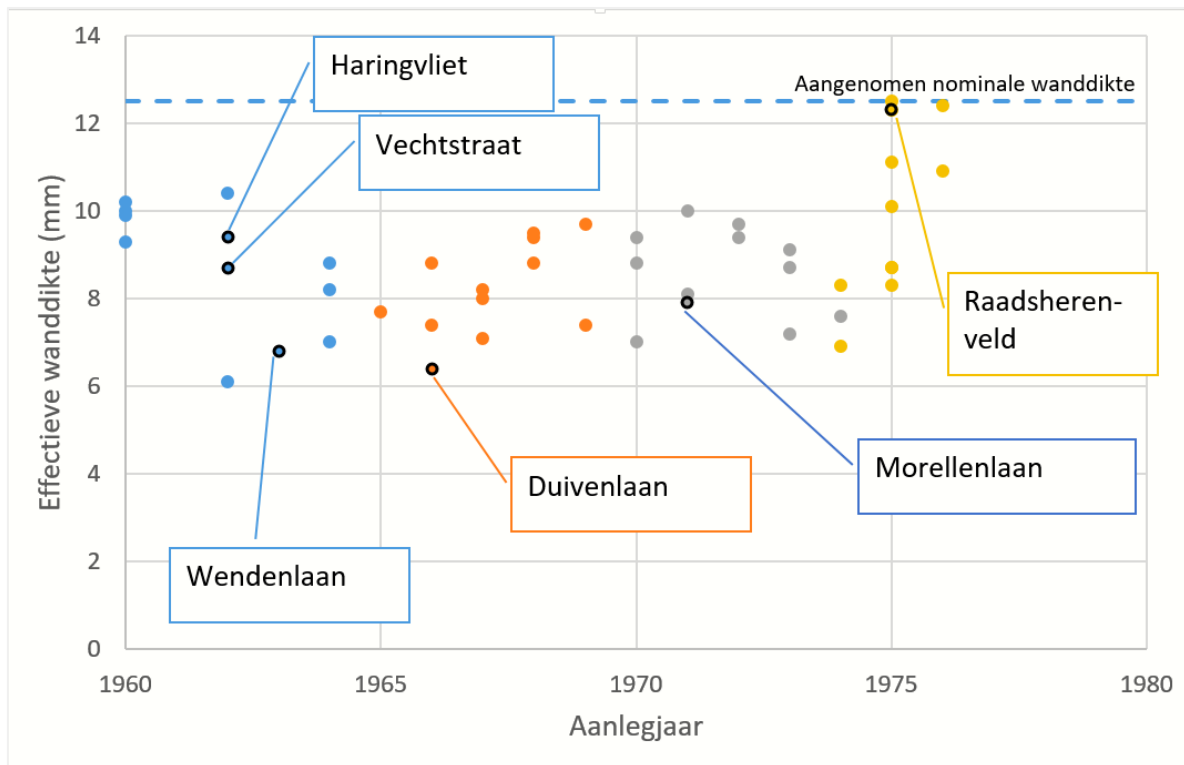
Periode	0-99 mm	100-149 mm	150-249 mm	250-399 mm	400-1000 mm	Totaal
60-69	1	130	62	7	0	201
70-79	0	78	33	13	0	125
totaal	2	208	95	20	1	326

Historisch overzicht van de drinkwatervoorziening in Apeldoorn:

- 1894: Utrechtse Waterleiding Maatschappij (UWM) gaat leidingwater leveren in Apeldoorn.
- 1915: Gemeente Apeldoorn neemt de levering van drinkwater over en vormt het Apeldoorns Waterleidingbedrijf.
- 1918: indeling met het gasbedrijf in de gemeentelijke technische bedrijven van Apeldoorn.
- 1957: verzelfstandiging van het gasbedrijf tot het Veluwe gasmaatschappij (VEGAS), dat het beheer krijgt over het waterleidingbedrijf.
- 1975: fusie Apeldoorn en Ede tot Veluwe nutsbedrijven (VNB). Later treden ook Wageningen en Rheden toe.
- 1994: fusie VNB en PGEM tot Nuon.
- 2002: fusie Nuon Water, Waterbedrijf Gelderland en Waterleiding Maatschappij Overijssel tot Vitens.
- 2006: fusie met Hydron Flevoland en Hydron Midden-Nederland tot huidige Vitens.

3.2 Metingen met ePulse

De metingen met ePulse zijn uitgevoerd door Echologics in september 2016 en de resultaten zijn beschreven in Echologics (2017). Door Vitens waren op basis van de periode van aanleg vier cohorten gedefinieerd, waar met ePulse twaalf metingen per cohort zijn uitgevoerd. Voor een overzicht van de resultaten van de metingen met ePulse, zie Bijlage I. De leidingen hadden een diameter van 100 mm en bij de bepaling van de effectieve wanddikte is Echologics uitgegaan van een nominale wanddikte van 12,5 mm. In Figuur 1 is een overzicht gegeven van de metingen met ePulse en zijn de zes leidingen gemarkeerd waarvan de toestand ook is getest met georadar en thymolftaleïne. Uit de metingen met ePulse blijkt dat er een aanzienlijke bandbreedte is van de gemeten effectieve wanddikte en dat er geen duidelijke relatie lijkt tussen het jaar van aanleg en de effectieve wanddikte. Wel blijkt dat enkele leidingen aangelegd na 1975 nauwelijks uitloging laten zien.



Figuur 1 De met ePulse gemeten effectieve wanddikte versus het aanlegjaar voor 48 leidingen verdeeld over 4 cohorten. De zes leidingen waarvan de toestand ook met georadar en thymolftaleïne zijn getest zijn specifiek aangegeven.

3.3 Metingen met georadar en thymolftaleïne

Door Vitens zijn van de leidingen die zijn onderzocht met ePulse vijf leidingen geselecteerd voor nadere analyse. Van deze vijf leidingen zijn meerdere buizen uitgenomen voor beproeving met georadar en thymolftaleïne. Daarnaast is er één extra buis uitgenomen in Raadsherenveld. De leiding is aangelegd in 1975 en komt niet voor vervanging in aanmerking. De betreffende buis kwam echter beschikbaar vanwege werkzaamheden en is daarom ook onderzocht met georadar en thymolftaleïne. In Tabel 2 is een overzicht gegeven van de aantallen onderzochte buizen, alsmede de gehanteerde coderingen voor ePulse (segment) en thymolftaleïne en georadar (cluster). Uit Tabel 2 blijkt dat 142 buizen zijn uitgenomen waarvan resultaten van georadarmetingen beschikbaar zijn. Van de clusters 31 (Haringvliet) en 16 (Morellenlaan) zijn niet van alle buizen resultaten beschikbaar van thymolftaleïnemetingen. In totaal zijn van 104 buizen resultaten beschikbaar van georadar en thymolftaleïne. De totale lengte waarover georadarmetingen in de lengterichting zijn uitgevoerd bedroeg 391,9 meter. Dit komt overeen met een gemiddelde lengte van 2,76 meter per buis.

Tabel 2 Eigenschappen van de uitgenomen buizen voor beproeving met georadar en thymolftaleïne.

Straatnaam	aanlegjaar	ePulse meting		Naam cluster (Georadar en thymolftaleïne)	aantal beproefde buizen		
		Naam segment	Cohort		Georadar	Thymol f.	Lengte met georadar
Haringvliet	1962	5	1	31	34	11	90,2
Vechtstraat	1962	4	1	30	26	26	79,2
Wendenlaan	1963	30	1	118	34	34	83,0
Duivenlaan	1966	42	2	25	24	24	68,9
Morellenlaan	1971	26	3	16	23	8	67,4
Raadsherenveld	1975	10	4	24	1	1	3,2
Som					142	104	391,9

In Tabel 3 zijn generieke gegevens opgenomen over alle buizen verstrekt door Vitens. Hieruit blijkt dat in normale omstandigheden alle buizen zich boven het grondwater bevinden, met uitzondering van de buizen in Raadsherenveld. Bij het ontgraven werd bij geen van de leidingen grondwater aangetroffen. Tevens blijkt dat alle leidingen zijn gelegen in zand, er geen sprake is van extra belastingen door wortels en dat er tijdens de uitname geen hoekverdraaiing op de verbindingen is aangetroffen. Door Vitens is een protocol opgesteld voor het uitnemen, transporteren en beproeven van de buizen, zie hiervoor Bijlage II.

Tabel 3 Generieke gegevens van leidingen en de omgeving zoals geregistreerd bij uitname

Omgevingsinvloeden	Opmerkingen
Verharding	trottoir
Grondsoort	overwegend zand met kleine hoeveelheden leem en klei
Diepteligging	1 m onder mv
Grondwaterstand	tijdens ontgraving geen grondwater aangetroffen, volgens het informatiemodel Lizzard zijn de leidingen gelegen boven de grondwaterspiegel, met uitzondering van de leiding in Raadsherenveld.
Begroeiing	overwegend lage begroeiing van aangrenzende tuinen
Boomwortels	geen
Bodemverontreiniging	geen
Visuele uitloging/aantasting uitwendig	niet bekeken
Visuele uitloging inwendig	licht grijs binnenkant buis gelijkmatige ring
Hoekverdraaiing aanwezig	buis ligt zonder hoekverdraaiing in de grond

4 Meetresultaten thymolftaleïne en georadar

4.1 Wanddikte

De sterkte van een AC-buis is onder andere afhankelijk van de wanddikte. Deze is niet in alle gevallen hetzelfde omdat tijdens de productiefase buizen van verschillende wanddikte werden geproduceerd. De afgegeven cataloguswaarde voor de wanddikte moet daarom vooral worden gezien als een minimum gegarandeerde wanddikte. Ook blijkt uit de praktijk dat buizen van verschillende drukklassen door elkaar zijn gebruikt. Firma MJ Oomen heeft bij elke georadarmeting de wanddikte gemeten door middel van een omtrekmeter. In dat geval wordt met een meetlint de buitenomtrek gemeten. Aangezien de binnendiameter een vaste maat is, kan de wanddikte berekend worden. In het geval van een meting met thymolftaleïne is ook de wanddikte op vier posities gemeten met een schuifmaat.

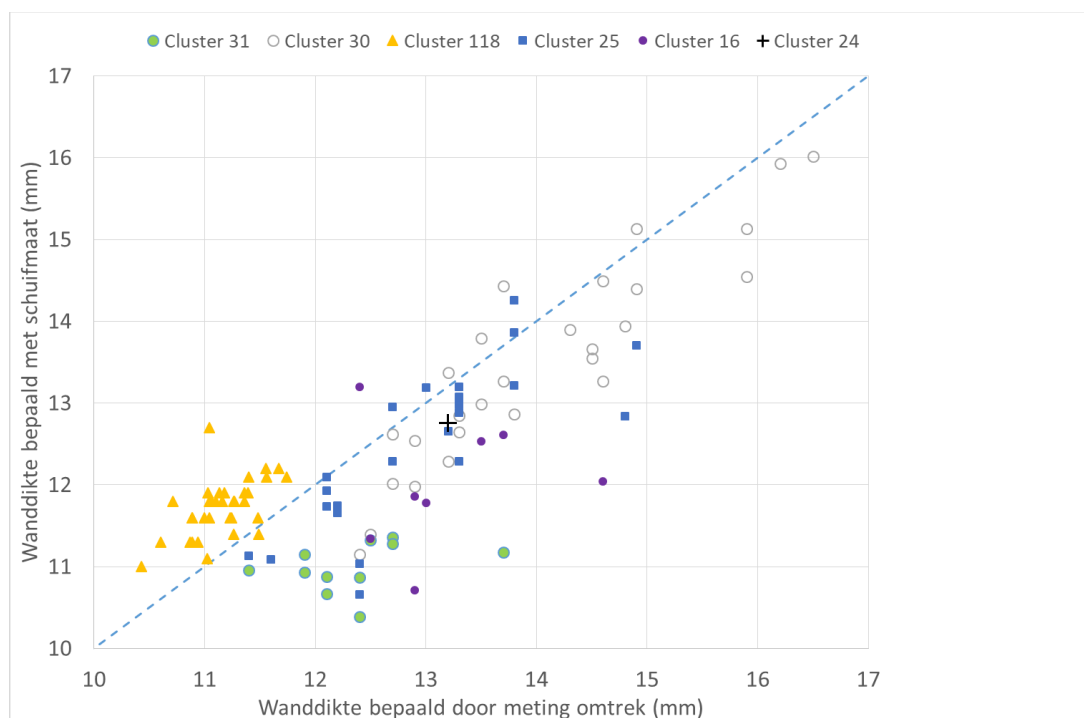
In de rapportage van Kraaijvanger (2019) is aangegeven dat de wanddikte bepaald met de omtrekmeter structureel groter is dan gemeten met een schuifmaat. Wij hebben dit opnieuw geanalyseerd en in Tabel 4 is per cluster de gemiddelde wanddikte gegeven. Hier blijkt dat de gemiddelde wanddikte groter is, in het geval deze is gemeten met een omtrekmeter. Een uitzondering hierbij is Cluster 118. De verschillen tussen de metingen zijn het grootst bij Cluster 31 en Cluster 16, respectievelijk 1,4 en 1,6 mm.

Tabel 4 Aantal buizen met een meting met georadar en thymolftaleïne en de bepaalde wanddikte.

Cluster	Aantal buizen met georadarmeting	Gemiddelde wanddikte (omtrekmeter) [mm]	Aantal buizen met thymolftaleïne meting	Gemiddelde wanddikte (schuifmaat) [mm]	Verskil wanddikte meting [mm]
31	34	12,4	11	11,0	1,4
30	26	14,0	27	13,5	0,5
118	34	11,2	34	11,7	-0,6
25	24	13,0	24	12,5	0,5
16	23	13,6	8	12,0	1,6
24	1	13,2	1	12,8	0,4
Allen	142	12,7	108	12,3	0,4

In Figuur 2 zijn per buis beide wanddiktemetingen vergeleken. In algemene zin valt de grote variatie aan wanddikten op. Verder vallen per cluster de volgende aspecten op:

- 1 Cluster 31: laat een grote spreiding zien bij de omtrekmeter (tussen 11,3 en 13,7 mm). De schuifmaatmeting is in vrijwel alle gevallen circa 11 mm.
- 2 Cluster 30: heeft een grote variatie in wanddikten, zowel gemeten met een schuifmaat als van de omtrek. De meting van de wanddikte met de schuifmaat varieert van 11,2 tot 16,0 mm.
- 3 Cluster 118: kent een relatief beperkte spreiding. De wanddikte gemeten door de omtrek is als enige groter dan die gemeten met een schuifmaat.
- 4 Cluster 25: heeft een vrij grote variatie in wanddikten en ook hier aanzienlijke verschillen tussen de wanddikte gemeten volgens beide methoden.
- 5 Cluster 16: kent de grootste verschillen, in het meest extreme geval 2,5 mm.



Figuur 2 Wanddiktebepalingen door meting van de omtrek en met een schuifmaat. Voor punten op de lijn geldt dat de wanddikte bepaalt met de omtrekmeting gelijk is aan die met de schuifmaat.

Volgens de werkinstructies zijn de wanddiktebepalingen op dezelfde buis en zelfs op dezelfde positie op de buis uitgevoerd. Verwacht zou worden dat de waarden grotendeels overeenkomen. De wanddikte gemeten met een schuifmaat zou af kunnen wijken als er bij het knippen een onregelmatig breukvlak is opgetreden. In het geval van een omtrekmeting is het mogelijk dat er nog resten grond of teer aan de buitenzijde van de wand aanwezig zijn en kan het lastig zijn om het meetlint strak om de buis te trekken. Daarom kan verwacht worden dat een meting met een schuifmaat nauwkeuriger is. Om die reden zijn deze waarden hier verder gehanteerd.

4.2 Metingen met georadar en thymolftaleïne

Door de firma M.J. Oomen zijn resultaten aangeleverd van metingen met georadar op 142 buisdelen. Oomen drukt de gemeten effectieve wanddikte met georadar uit als percentage van de wanddikte. Voor de vergelijking zijn daarom ook de resultaten van de thymolftaleïnemetingen uitgedrukt als percentage van de oorspronkelijke wanddikte. Voor de analyse van de metingen is tevens een vergelijking gemaakt van de minimum gemeten effectieve wanddikte. De minimumwaarde is interessant voor de beoordeling van de buis. Het is namelijk op de positie met de kleinste effectieve wanddikte waar een leiding als eerste zal bezwijken (in geval van een gelijkmatige belasting op alle delen van de buis).

4.2.1 Cluster 31, Haringvliet

Cluster 31 bestaat uit 34 buisdelen. Er zijn georadarmetingen in de lengterichting uitgevoerd over 90,17 m. Op elf buisdelen is op vier klokstanden een thymolftaleïnemeting uitgevoerd op dezelfde locatie als de radiaalmeting. Georadarmetingen in lengte- en radiaalrichting zijn uitgevoerd met een dichtheid van 100 metingen per meter.

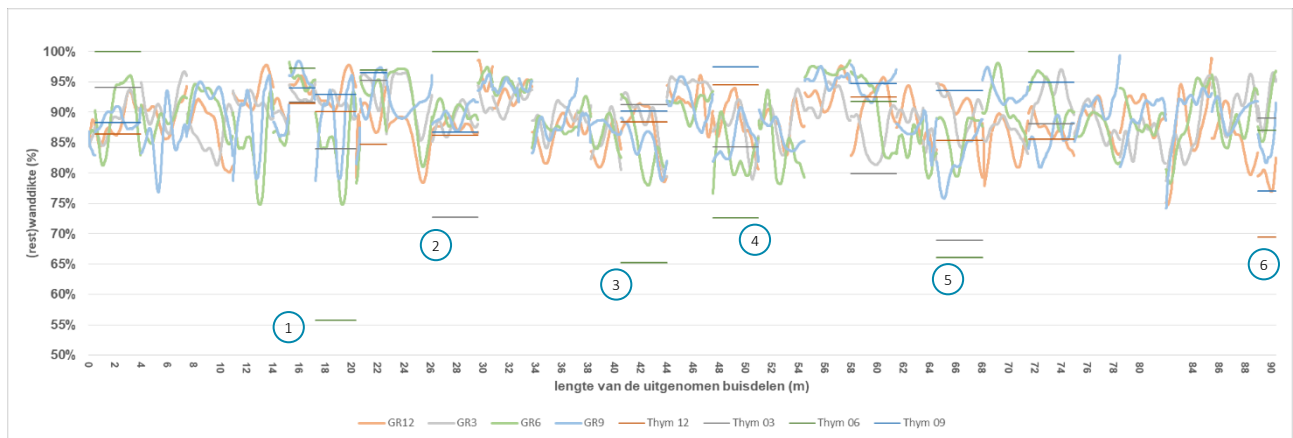
Een overzicht van de meetwaarden is weergegeven in Tabel 5. De gemiddelde effectieve wanddikte gemeten met georadar in de lengterichting varieert tussen 88,9% en 89,6%. De gemiddelde waarde in de radiaalrichting betreft 88,9%. De gemiddelde effectieve wanddikte gemeten met thymolftaleïne betreft 87,1%. De minimum effectieve wanddikte gemeten met georadar in de lengterichting varieert tussen 74,2% en 78,7%. De minimumwaarde in de radiaalrichting betreft 75,2%. De minimum effectieve wanddikte gemeten met thymolftaleïne betreft 55,8%. Uit

deze vergelijking blijkt dat de meeste waarden redelijk overeenkomen, echter met thymolftaleïne wordt een minimale effectieve wanddikte gemeten die aanzienlijk lager is dan bij georadar. De standaarddeviatie van de georadarmetingen komt redelijk overeen, te weten 4,5% voor alle klokstanden en 4,8% voor de radiaalmetingen. Voor de thymolftaleïnemeting is deze veel groter, namelijk 10,2%, wat inhoudt dat de spreiding aanzienlijk groter is.

Tabel 5 Overzicht meetwaarden Cluster 31, Haringvliet

	Georadarmeting, klokstand					Georadar, radiaal	Thymolftaleïnemeting			
	12 uur	3 uur	6 uur	9 uur	Gem.		Uitl. inw.	Uitl. uitw.	Wandd.	Perc. uitl.
N	9044	9051	9051	9051	36197	1323	44	44	44	44
Min	74,7%	78,7%	74,8%	74,2%	74,2%	75,2%	1,4	5,5	13,9	55,8%
Max	99,0%	97,1%	98,6%	99,3%	99,3%	99,3%	0,0	0,0	10,4	100,0%
Gem	88,9%	89,6%	89,0%	89,3%	89,2%	88,9%	0,7	0,8	11,3	87,1%
SD	4,3%	3,8%	5,1%	4,5%	4,5%	4,8%				10,2%

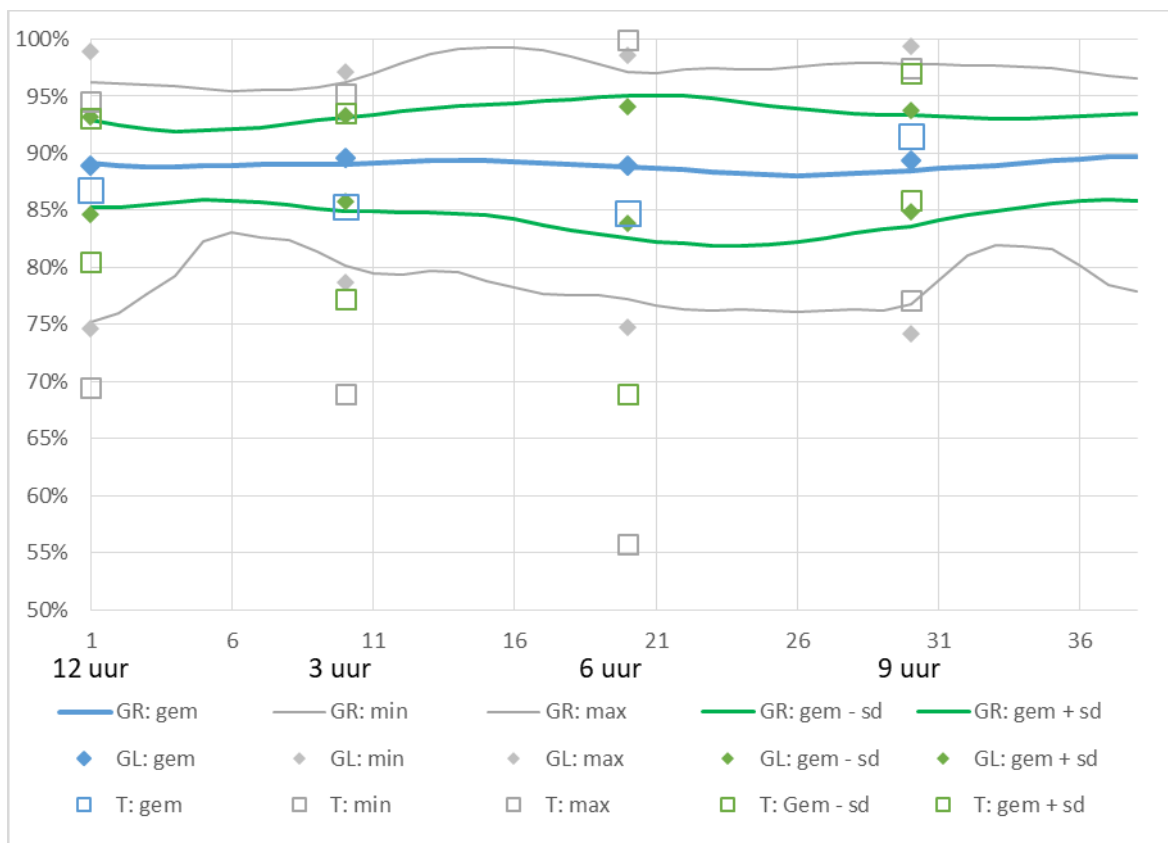
In Figuur 3 zijn alle lengtemetingen met georadar weergegeven en de thymolftaleïnemetingen. De lengtemetingen betreffen de gehele lengte van de buis, voor de thymolftaleïnemetingen geldt dat dit per klokstand één waarde betreft. Om die reden is het niet zeker dat dit ook de minimum effectieve wanddikte is. Het blijkt dat in zes buizen de thymolftaleïnemeting een aanzienlijk lagere effectieve wanddikte aangeeft dan die gemeten met georadar. In bijlage II zijn foto's opgenomen van de punten 1 en 3. De gemeten effectieve wanddikte met thymolftaleïne van respectievelijk 56% en 65% zijn hier goed te herkennen.



Figuur 3 Gemeten effectieve wanddikte in Cluster 31 op vier klokstanden met georadar in de lengterichting als percentage van de totale wanddikte. Tevens zijn de metingen met thymolftaleïne toegevoegd.

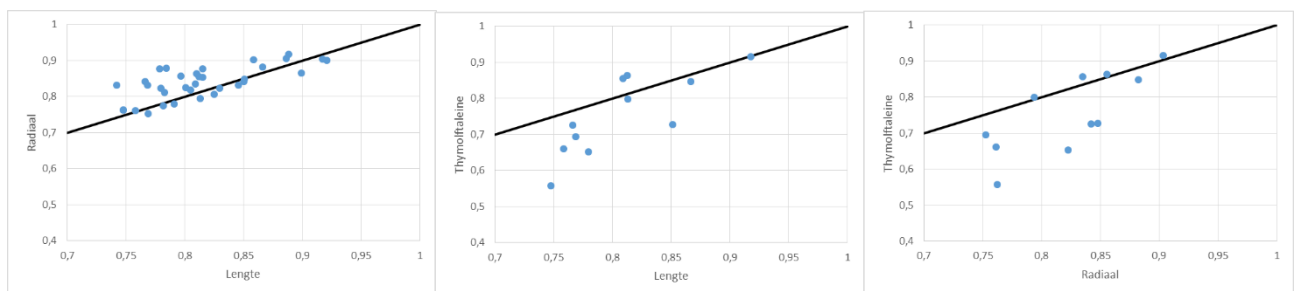
In Figuur 4 zijn de radiaalmetingen met georadar weergegeven en op de vier klokstanden de lengtemetingen met georadar en de thymolftaleïnemetingen. Er zijn gemiddeld 39 radiaalmetingen per buis uitgevoerd. Aangenomen is dat de positie van de eerste radiaalmeting overeenkomt met de metingen 'op 12 uur' (lengtemeting georadar en thymolftaleïne). In deze figuur is per meting het volgende weergegeven: de gemiddelden (in blauw), de minimumwaarden en de maximum waarden (in grijs) en de gemiddelden plus één maal de standaarddeviatie en de gemiddelden min de standaarddeviatie (in groen). Bij aanname van een normale verdeling van de meetwaarden zal 68% van de metingen zich tussen deze laatste twee waarden bevinden.

De gemiddelde waarden in Figuur 4 bevinden zich tussen 85% en 92%. De minimumwaarde op '6 uur' gemeten met thymolftaleïne is net als in Figuur 3, punt 1 aanzienlijk lager dan de minimum waarde met georadar. Ook op de klokstanden '12 uur' en '3 uur' zijn de minimumwaarden met thymolftaleïne lager dan met georadar.



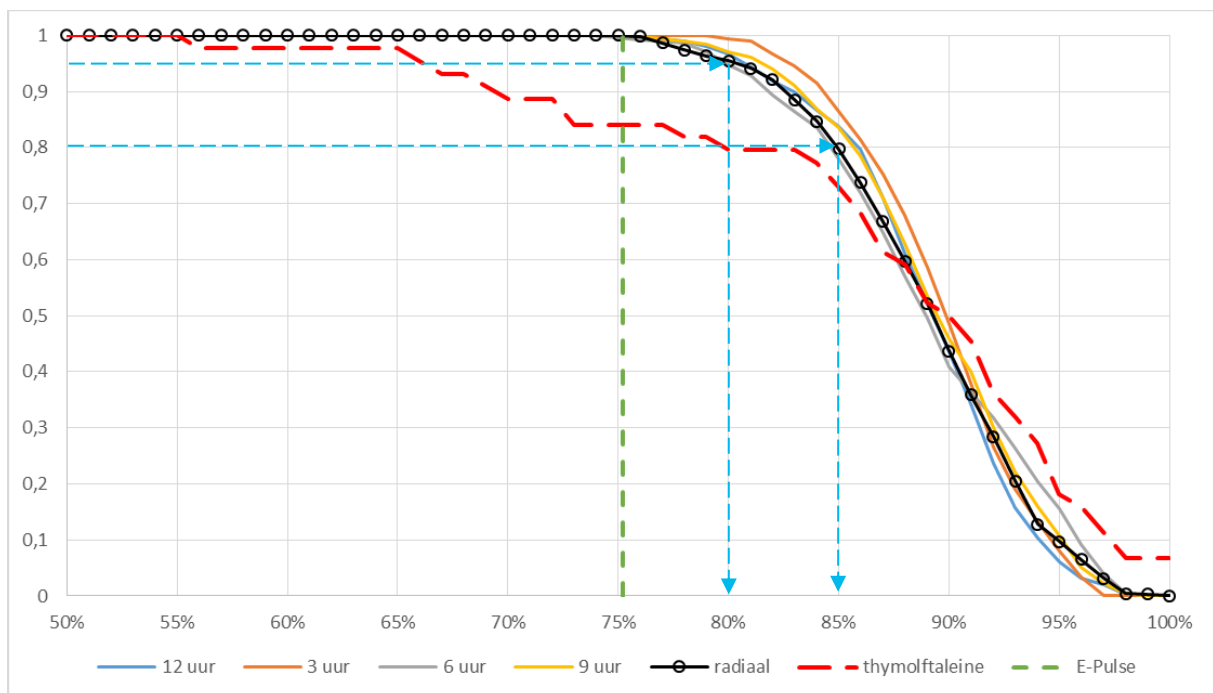
Figuur 4 Gemeten effectieve wanddikte in Cluster 31 in de radiaalrichting met georadar (GR) als percentage van de totale wanddikte. Tevens zijn op de vier klokstanden de metingen met georadar in de lengterichting (GL) en met thymolftaleïne (T) toegevoegd.

Voor buisdelen waar overeenkomstige metingen zijn uitgevoerd, zijn in Figuur 5 minimum effectieve wanddikten vergeleken. Deze gelden per buis als maatgevend.



Figuur 5 Gemeten minimum effectieve wanddikte van overeenkomende buisdelen. (Links: georadar lengterichting versus georadar radiaalrichting- N=34. Midden: georadar lengterichting versus thymolftaleïne-N=11. Rechts: Georadar lengterichting versus thymolftaleïne-N=11). De zwarte lijn verbindt gelijke waarden.

Uit de drie figuren van Figuur 5 is de positie van elk punt ten opzichte van de zwarte lijn relevant. Als de waarde op de x-as gelijk is aan die van de y-as, dan ligt deze op de zwarte lijn. Uit de linker figuur blijkt dat de meeste minimumwaarden van radiaalmetingen hoger zijn dan die van lengtemetingen. Het maximum verschil bedraagt circa 10%. Uit de beide andere figuren blijkt dat een aanzienlijk aantal minimumwaarden van thymolftaleïnemetingen lager zijn dan die van metingen met georadar, zowel in lengte- als in radiaalrichting. De maximum afwijking bedraagt circa 20% en lijkt met name op te treden bij de buizen met de grootste uitloging (met de laagste effectieve wanddikte).



Figuur 6 Cumulatieve frequentieverdeling van de metingen met georadar in de lengterichting over vier klokstanden, de meting met georadar in de radiaalrichting, de metingen met thymolftaleïne en de meting met ePulse. Op de y-as het aandeel en op de x-as de waarden per meting als percentage effectieve wanddikte. De pijlen behoren bij de toelichting die hieronder is gegeven.

In Figuur 6 zijn cumulatieve frequentieverdelingen weergegeven van alle uitgevoerde metingen op cluster 31. Deze verdelingen geven informatie over de verdeling van de meetwaarden in dit cluster. Onderlinge vergelijking laat zien of de meetwaarden systematisch afwijken. Bij meer meetwaarden heeft de lijn een vloeiender verloop. De figuur laat zich als volgt lezen: 80% van de radiaalmetingen heeft een effectieve wanddikte groter of gelijk aan 85% en 95% groter of gelijk aan 80%. Anders gezegd 20% heeft een uitloping die groter is dan 15% en 5% groter dan 20%. De thymolftaleïnemetingen met een grote uitloping zijn ook terug te vinden, namelijk 97% van de metingen heeft een effectieve wanddikte groter of gelijk aan 56%, of 3% heeft een uitloping groter dan 44%. In deze figuur is ook de waarde geplaatst die geldt voor de meting met ePulse. Dit betreft één meetwaarde die 75,2% bedraagt.

Uit Figuur 6 blijkt dat de verdeling van de georadarmetingen op de vier klokstanden én in de lengterichting redelijk goed overeenkomen. De meting met thymolftaleïne geeft een aantal kritische lage waarden die niet herkend worden door georadar. De ePulsemeting komt ongeveer overeen met de minimale waarden die zijn gemeten met georadar, maar is aanzienlijk hoger dan de minimumwaarden gemeten met thymolftaleïne. De grafiek toont het belang aan van de maatgevende minimumwaarden. Het gaat er dus niet om dat bijvoorbeeld 90% van de waarden overeenkomen, maar dat de laagste en daardoor maatgevende waarden worden geïdentificeerd.

4.2.2 Cluster 30, Vechtstraat

Cluster 30 bestaat uit 26 buisdelen. Er zijn georadarmetingen in de lengterichting uitgevoerd over 79,24 m. Op alle buisdelen is een radiaalmeting uitgevoerd met georadar en is op dezelfde locatie op vier klokstanden een thymolftaleïnemeting uitgevoerd. Georadarmetingen in lengte- en radiaalrichting zijn uitgevoerd met een dichtheid van 200 metingen per meter.

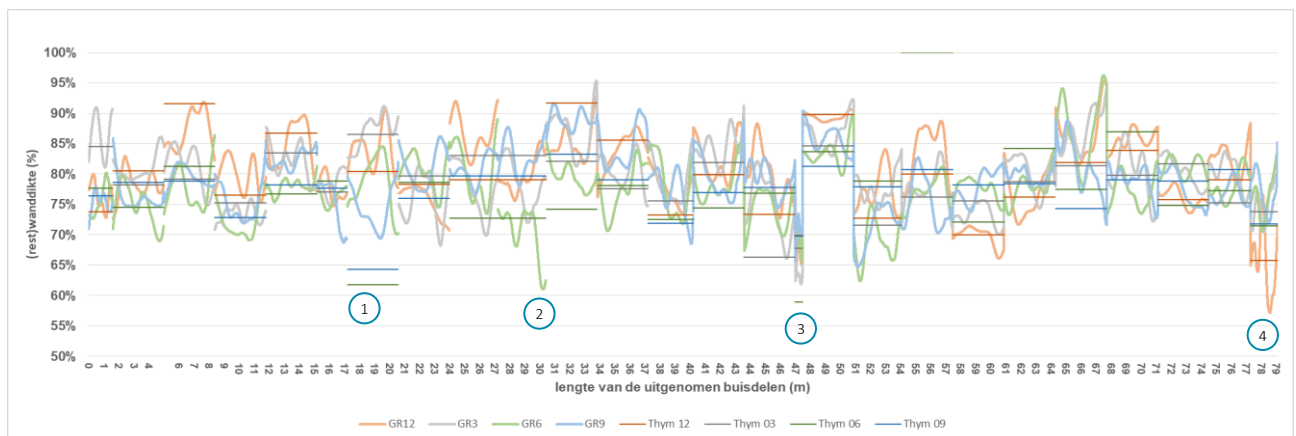
Een overzicht van de meetwaarden is weergegeven in Tabel 6. De gemiddelde effectieve wanddikte gemeten met georadar in de lengterichting varieert tussen 77,5% en 80,9%. De gemiddelde waarde in de radiaalrichting betreft 77,9%. De gemiddelde effectieve wanddikte gemeten met thymolftaleïne betreft 77,5%. De minimum effectieve wanddikte gemeten met georadar in de lengterichting varieert tussen 57,1% en 64,7%. De minimumwaarde in de

radiaalrichting betreft 61,9%. De minimum effectieve wanddikte gemeten met thymolftaleïne betreft 59,0%. De standaarddeviatie van de georadarmetingen in de lengterichting voor alle klokstanden (5,5%) is groter dan die in de radiaalrichting (5,0%), maar kleiner dan die voor de thymolftaleïnemeting (6,0%). Uit deze vergelijking blijkt dat de meeste waarden redelijk overeenkomen, wat ook geldt voor de thymolftaleïnemeting.

Tabel 6 Overzicht meetwaarden Cluster 30, Vechtstraat

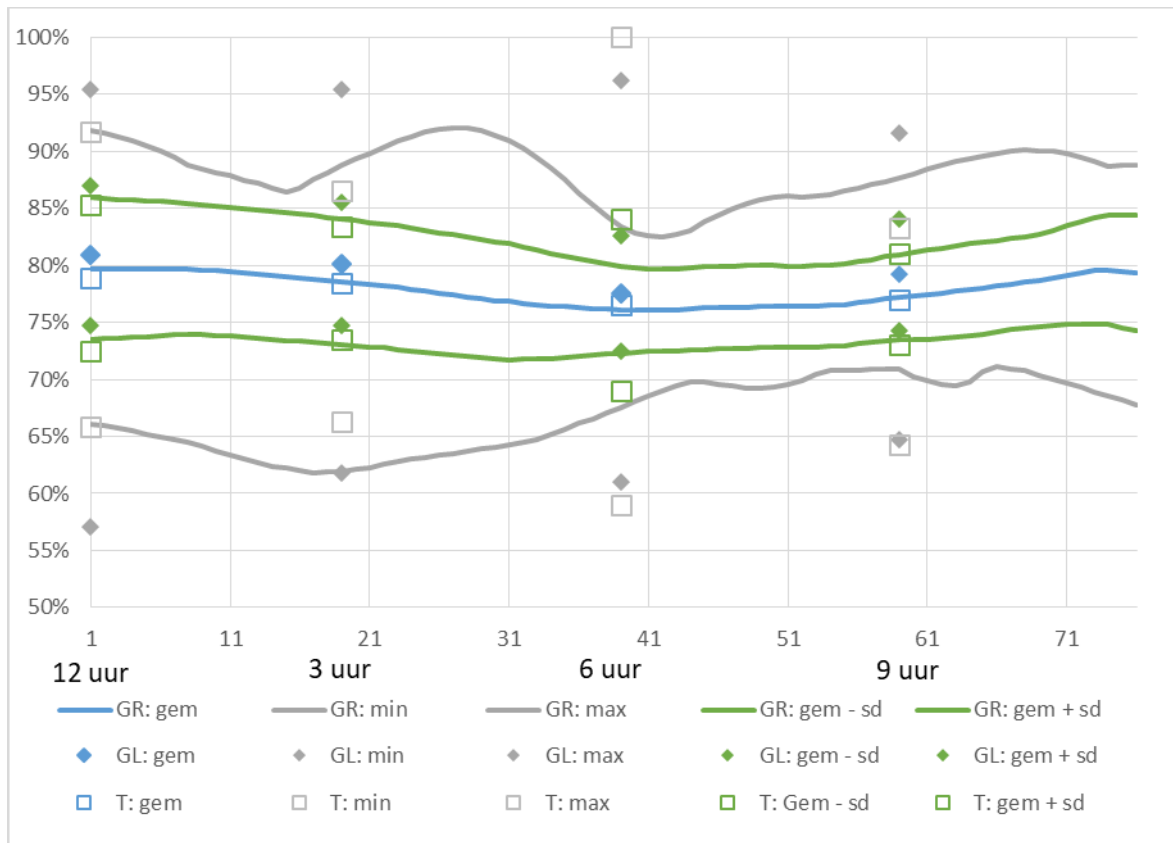
	Georadarmeting, klokstand					Georadar, radiaal	Thymolftaleïnemeting			
	12 uur	3 uur	6 uur	9 uur	Gem.		Uitl. inw.	Uitl. uitw.	Wandd.	Perc. uitl.
N	15874	15874	15874	15874	63496	2060	104	104	104	104
Min	57,1%	61,8%	61,0%	64,7%	57,1%	61,9%	5,0	0,0	16,5	59,0%
Max	95,4%	95,4%	96,2%	91,6%	96,2%	92,1%	0,0	0,0	11,4	100,0%
Gem	80,9%	80,2%	77,5%	79,1%	79,4%	77,9%	3,1	0,0	13,7	77,5%
SD	6,1%	5,4%	5,0%	4,9%	5,5%	5,0%				6,0%

In Figuur 7 zijn alle lengtemetingen met georadar weergegeven en de thymolftaleïnemetingen. Voor punten 1 en 3 geldt dat de thymolftaleïnemetingen lagere waarden aangeven dan de georadarmeting. Van deze punten zijn in bijlage II foto's opgenomen van thymolftaleïnemetingen. De gemeten effectieve wanddikte van de punten betreft respectievelijk 59% en 62%. Op de foto lijkt een dergelijke grote inwendige uitloging niet zichtbaar. Voor de punten 2 en 4 geldt dat de georadarmetingen aanzienlijk lager is dan de thymolftaleïnemetingen. Dit kan er op duiden dat de thymolftaleïnemetingen niet op de meest aangetaste locatie op de buis zijn uitgevoerd.



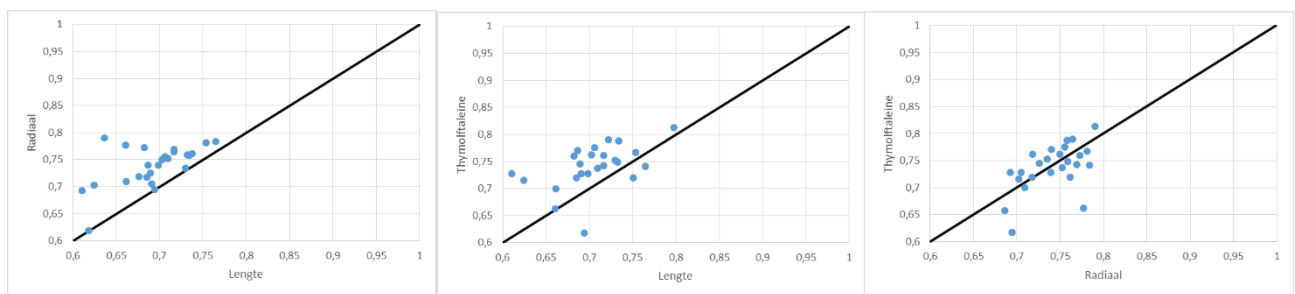
Figuur 7 Gemeten effectieve wanddikte in Cluster 30 op vier klokstanden met georadar in de lengterichting als percentage van de totale wanddikte. Tevens zijn de metingen met thymolftaleïne toegevoegd.

In Figuur 8 zijn de radiaalmetingen met georadar weergegeven en op de vier klokstanden de lengtemetingen met georadar en de thymolftaleïnemetingen. Alle gemiddelden komen op alle klokstanden relatief goed overeen met waarden tussen de 75% en 81%.



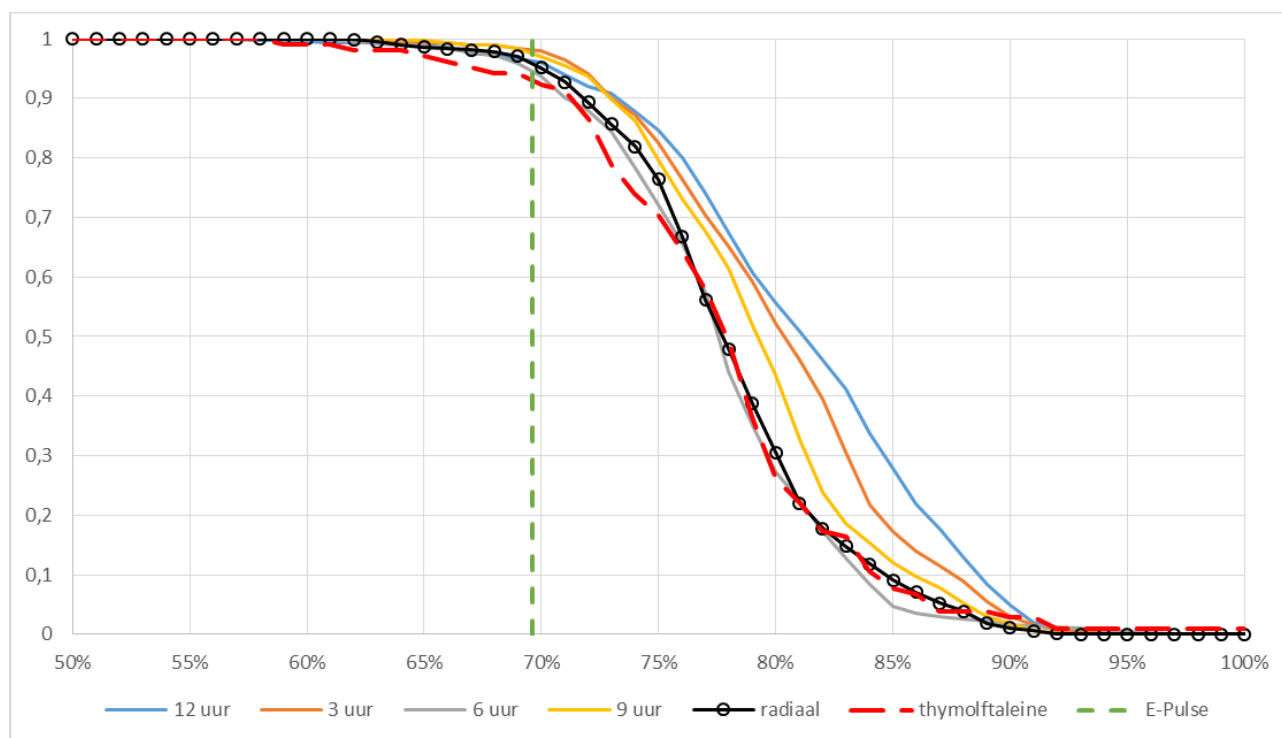
Figuur 8 Gemeten effectieve wanddikte in Cluster 30 in de radiaalrichting met georadar (GR) als percentage van de totale wanddikte. Tevens zijn op de vier klokstanden de metingen met georadar in de lengterichting (GL) en met thymolftaleïne (T) toegevoegd.

Voor buisdelen waar overeenkomstige metingen zijn uitgevoerd, zijn in Figuur 9 minimum effectieve wanddikten vergeleken.



Figuur 9 Gemeten minimum effectieve wanddikte van overeenkomende buisdelen. (Links: georadar lengterichting versus georadar radiaalrichting- N=26. Midden: georadar lengterichting versus thymolftaleïne-N=26. Rechts: Georadar lengterichting versus thymolftaleïne-N=26). De zwarte lijn verbindt gelijke waarden.

Uit Figuur 9 - links blijkt wederom dat de meeste minimumwaarden van radiaalmetingen hoger zijn dan die van lengtemetingen. De maximum afwijking bedraagt circa 15%. Uit beide andere figuren blijkt dat een aantal minimumwaarden van thymolftaleïnemetingen lager zijn dan die van metingen met georadar, zowel in lengte- als in radiaalrichting. De maximum afwijking bedraagt circa 10% en is daarmee kleiner dan in Cluster 31.



Figuur 10 Cumulatieve frequentieverdeling van de metingen met georadar in de lengterichting over vier klokstanden, de meting met georadar in de radiaalrichting, de metingen met thymolftaleïne en de meting met ePulse. Op de y-as het aandeel en op de x-as de waarden per meting als percentage effectieve wanddikte.

In Figuur 10 zijn cumulatieve frequentieverdelingen gemaakt van alle uitgevoerde metingen op cluster 30. Overeenkomstig de voorgaande figuren, komt de verdeling van de waarden tussen de georadarmetingen en de thymolftaleïnemetingen redelijk overeen. Opvallend is dat in dit cluster de uitloging aan de bovenzijde (klokstand 12) de grootste uitloging kent. De minimumwaarden zijn in alle gevallen lager dan aangegeven met ePulse (69,6%).

4.2.3 Cluster 118, Wendenlaan

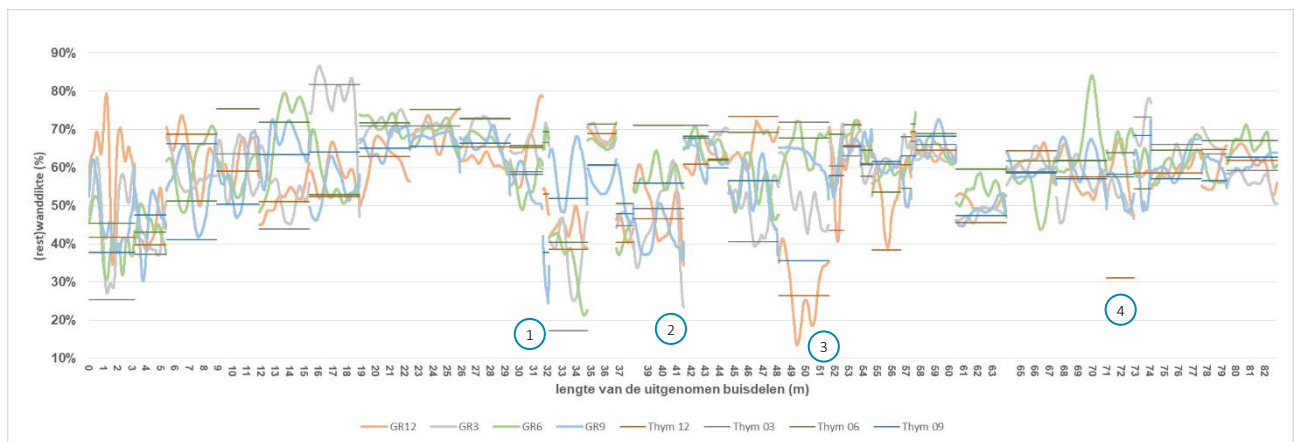
Cluster 118 bestaat uit 34 buisdelen. Er zijn georadarmetingen in de lengterichting uitgevoerd over 82,99 m. Op alle buisdelen is een radiaalmeting uitgevoerd met georadar en is op dezelfde locatie op vier klokstanden een thymolftaleïnemeting uitgevoerd. Georadarmetingen in lengte- en radiaalrichting zijn uitgevoerd met een dichtheid van 200 metingen per meter.

Een overzicht van de meetwaarden is weergegeven in Tabel 7. De gemiddelde effectieve wanddikte gemeten met georadar in de lengterichting varieert tussen 57,6% en 59,8%. De gemiddelde waarde in de radiaalrichting betreft 58,3%. De gemiddelde effectieve wanddikte gemeten met thymolftaleïne betreft 58,7%. De minimum effectieve wanddikte gemeten met georadar in de lengterichting varieert tussen 13,5% en 24,5%. De minimumwaarde in de radiaalrichting betreft 22,4%. De minimum effectieve wanddikte gemeten met thymolftaleïne betreft 17,2%. De standaarddeviatie van de georadarmetingen in de lengterichting (10,1%) en in de radiaalrichting (11,0%) en de standaarddeviatie voor de thymolftaleïnemeting (11,5%) is ongeveer gelijk. Opvallend in dit cluster is dus de zeer lage effectieve wanddikte, zowel voor de gemiddelde waarde als voor de minimumwaarden.

Tabel 7 Overzicht meetwaarden Cluster 118, Wendenlaan

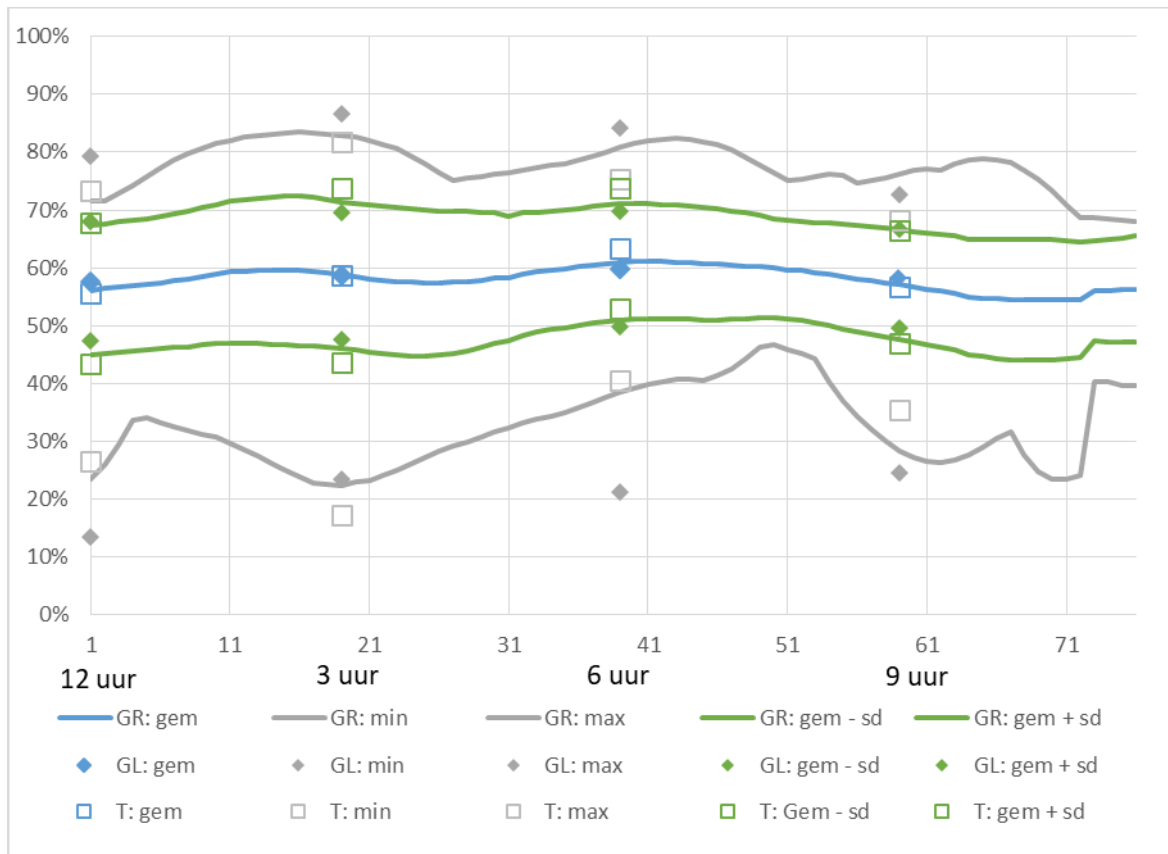
	Georadarmeting, klokstand					Georadar, radiaal	Thymolftaleïnemeting			
	12 uur	3 uur	6 uur	9 uur	Gem.		Uitl. inw.	Uitl. uitw.	Wandd.	Perc. uitl.
N	16632	16632	16632	16632	66528	2614	136	136	136	136
Min	13,5%	23,4%	21,2%	24,5%	13,5%	22,4%	6,2	4,9	12,7	17,2%
Max	79,4%	86,6%	84,2%	72,6%	86,6%	83,5%	2,2	0,0	10,4	81,7%
Gem	57,6%	58,6%	59,8%	58,3%	58,6%	58,3%	4,1	0,6	11,4	58,7%
SD	10,4%	10,9%	10,0%	8,7%	10,1%	11,0%				11,5%

In Figuur 11 zijn alle lengtemetingen met georadar weergegeven en de thymolftaleïnemetingen. Voor een groot deel van de onderzochte buizen geldt dat de waarden gemeten met georadar in de lengterichting redelijk overeenkomen met de met thymolftaleïne gemeten waarden. Voor punten 2 en 3 geldt dat de georadarmetingen in lagere waarden resulteren dan de thymolftaleïnemetingen. Dit kan er op duiden dat de thymolftaleïnemetingen niet op de meest aangetaste locatie op de buis zijn uitgevoerd. Voor punten 1 en 4 geldt dat de georadarmetingen in hogere waarden resulteren dan de thymolftaleïnemetingen. Van de punten 1 en 4 zijn in bijlage II foto's opgenomen van thymolftaleïnemetingen. De gemeten effectieve wanddikte van de punten betreft respectievelijk 17% en 31%. De effectieve wanddikte lijkt op de foto meer te zijn dan 17% (punt 1). De effectieve wanddikte van 31% (punt 4) lijkt correct.



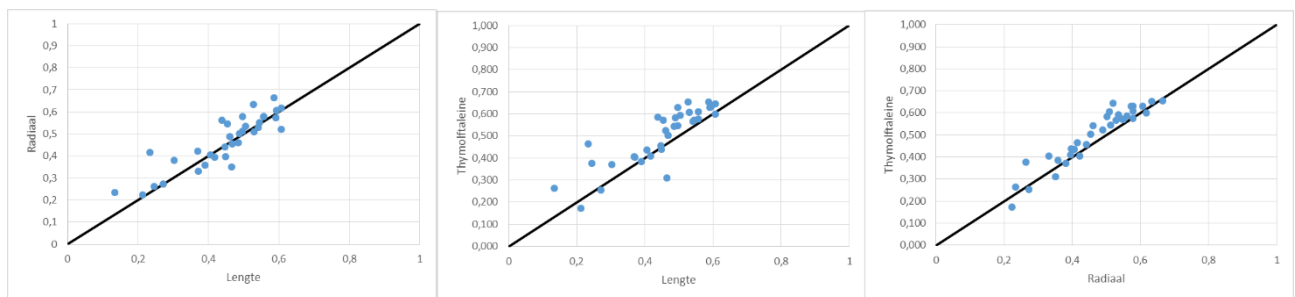
Figuur 11 Gemeten effectieve wanddikte in Cluster 118 op vier klokstanden met georadar in de lengterichting als percentage van de totale wanddikte. Tevens zijn de metingen met thymolftaleïne toegevoegd.

In Figuur 12 zijn de radiaalmetingen met georadar weergegeven en op de vier klokstanden de lengtemetingen met georadar en de thymolftaleïnemetingen. Alle gemiddelden komen op alle klokstanden relatief goed overeen met waarden tussen de 55% en 60%. Er is op alle klokstanden en in de radiaalrichting een grote spreiding.



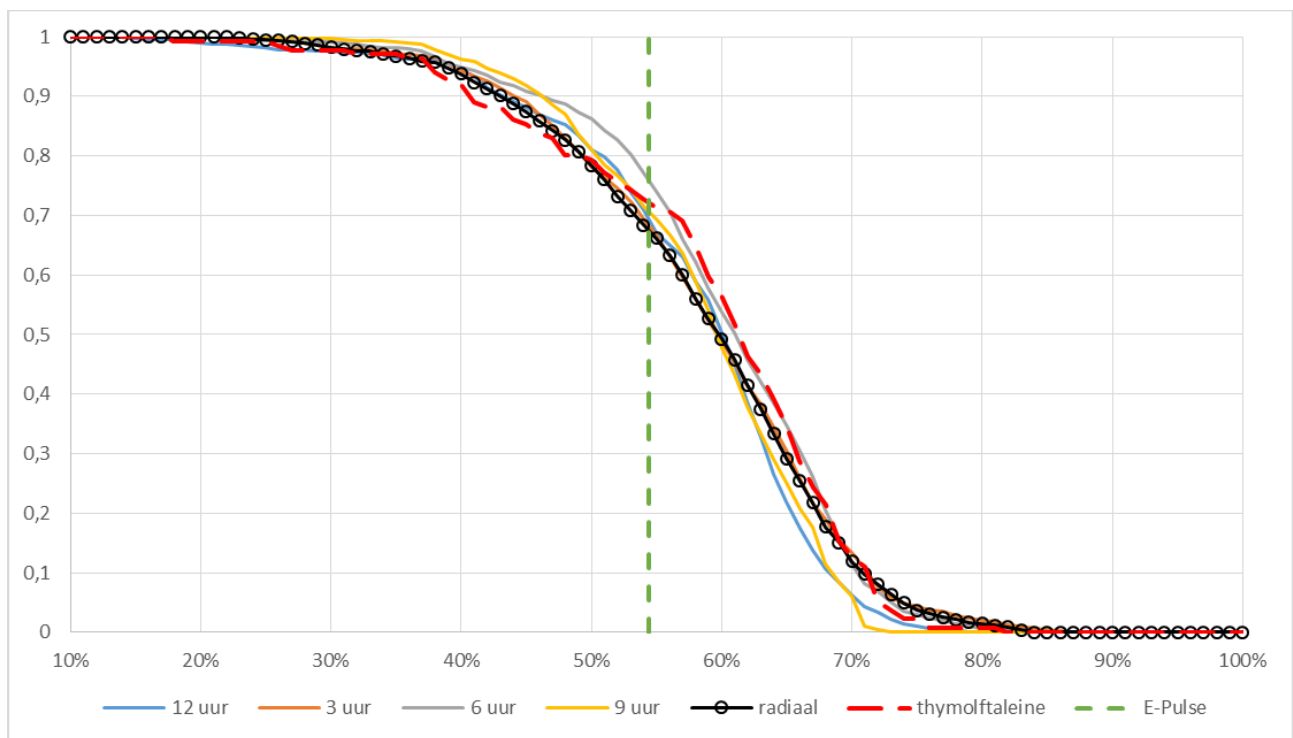
Figuur 12 Gemeten effectieve wanddikte in Cluster 118 in de radiaalrichting met georadar (GR) als percentage van de totale wanddikte. Tevens zijn op de vier klokstanden de metingen met georadar in de lengterichting (GL) en met thymolfaleïne (T) toegevoegd.

Voor buisdelen waar overeenkomstige metingen zijn uitgevoerd, zijn in Figuur 13 minimum effectieve wanddikten vergeleken.



Figuur 13 Gemeten minimum effectieve wanddikte van overeenkomende buisdelen. (Links: georadar lengterichting versus georadar radiaalrichting- N=34. Midden: georadar lengterichting versus thymolfaleïne-N=34. Rechts: Georadar lengterichting versus thymolfaleïne-N=34). De zwarte lijn verbindt gelijke waarden.

Uit Figuur 13 - links blijkt dat de minimum waarden met radiaalmetingen iets vaker hoger zijn dan die van lengtemetingen. De maximum afwijking bedraagt circa 18%. Uit beide andere figuren blijkt dat de minimum waarden van thymolfaleïnemetingen beter overeenkomen met radiaal metingen dan met lengtemetingen. Dit is logisch omdat deze metingen op dezelfde locatie zijn uitgevoerd.



Figuur 14 Cumulatieve frequentieverdeling van de metingen met georadar in de lengterichting over vier klokstanden, de meting met georadar in de radiaalrichting, de metingen met thymolftaleïne en de meting met ePulse. Op de y-as het aandeel en op de x-as de waarden per meting als percentage effectieve wanddikte.

In Figuur 14 zijn cumulatieve frequentieverdelingen gemaakt van alle uitgevoerde metingen op cluster 118. Overeenkomstig de voorgaande figuren, komt de verdeling van de waarden tussen de georadarmetingen en de thymolftaleïnemetingen goed overeen. De minimum waarden zijn in alle gevallen aanzienlijk lager dan aangegeven met ePulse (54,4%). Georadarmetingen en thymolftaleïnemetingen wijzen uit dat deze leiding in slechte conditie is, ePulse laat dat veel minder goed zien.

4.2.4 Cluster 25, Duivenlaan

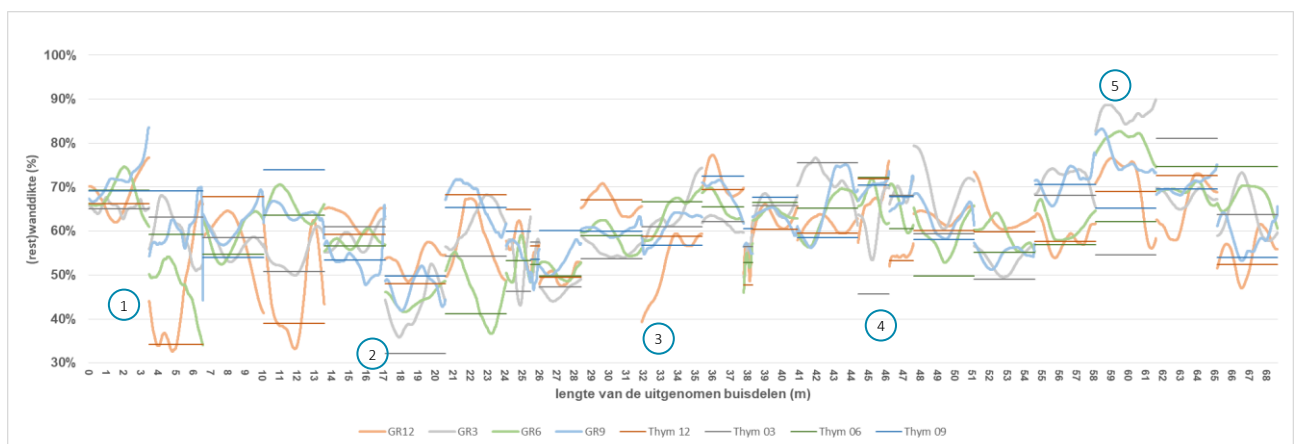
Cluster 25 bestaat uit 24 buisdelen. Er zijn georadarmetingen in de lengterichting uitgevoerd over 68,87 m. Op alle buisdelen is een radiaalmeting uitgevoerd met georadar en is op dezelfde locatie op vier klokstanden een thymolftaleïnemeting uitgevoerd. Georadarmetingen in lengte- en radiaalrichting zijn uitgevoerd met een dichtheid van 200 metingen per meter.

Een overzicht van de meetwaarden is weergegeven in Tabel 8. De gemiddelde effectieve wanddikte gemeten met georadar in de lengterichting varieert tussen 59,6% en 62,7%. De gemiddelde waarde in de radiaalrichting betreft 60,1%. De gemiddelde effectieve wanddikte gemeten met thymolftaleïne betreft 59,8%. De minimum effectieve wanddikte gemeten met georadar in de lengterichting varieert tussen 32,6% en 41,9%. De minimumwaarde in de radiaalrichting betreft 32,8%. De minimum effectieve wanddikte gemeten met thymolftaleïne betreft 32,2%. De standaarddeviatie van de georadarmetingen in de lengterichting (9,2%) en in de radiaalrichting (9,4%) en de standaarddeviatie voor de thymolftaleïnemeting (9,1%) zijn ongeveer gelijk.

Tabel 8 Overzicht meetwaarden Cluster 25, Duivenlaan

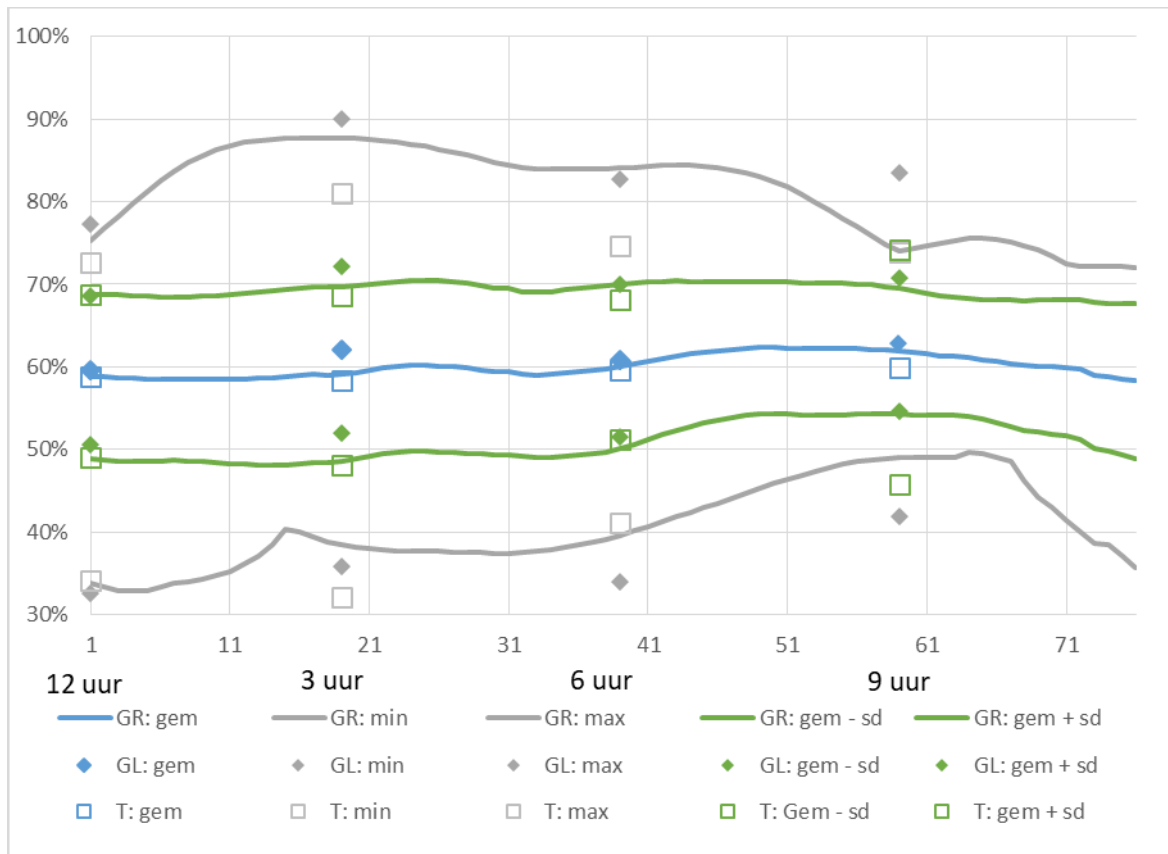
	Georadarmeting, klokstand					Georadar, radiaal	Thymolftaleïnemeting			
	12 uur	3 uur	6 uur	9 uur	Gem.		Uitl. inw.	Uitl. uitw.	Wandd.	Perc. uitl.
N	13775	13775	13775	13775	55100	1886	95	95	95	95
Min	32,6%	35,8%	34,0%	41,9%	32,6%	32,8%	7,6	1,6	14,7	32,2%
Max	77,3%	90,0%	82,7%	83,6%	90,0%	87,7%	2,7	0,0	10,7	81,1%
Gem	59,6%	62,0%	60,8%	62,7%	61,3%	60,1%	5,0	0,050	12,7	59,8%
SD	9,0%	10,1%	9,2%	8,0%	9,2%	9,4%				9,1%

In Figuur 15 zijn alle lengtemetingen met georadar weergegeven en de thymolftaleïnemetingen. Punt 1 illustreert de wisselende kwaliteit van AC-buizen. Waar de eerste buis een effectieve wanddikte heeft die zich voornamelijk bevindt tussen 65% en 75%, is deze bij de volgende buis bij bepaalde metingen ongeveer 35%. Op punt 2 bevindt zich de minimum waarde (32,2%) van de thymolftaleïnemeting en een redelijk overeenkomstige lage waarde met georadar. De foto's die zijn genomen van thymolftaleïnemetingen (zie bijlage II) laten eerder een minimum effectieve wanddikte zien van 50%, afwijkend dus van beide metingen. Voor punt 3 geldt dat de georadarmeting aanzienlijk lagere waarden geeft dan de thymolftaleïnemetingen. Dit kan er op duiden dat de thymolftaleïnemetingen niet op de meest aangetaste locatie op de buis zijn uitgevoerd. Voor punt 4 geldt dat de thymolftaleïnemetingen lagere waarden aangeven dan de georadarmeting. Punt 5 is opmerkelijk omdat het verschil tussen de georadarmeting en de thymolftaleïnemeting om '3 uur' erg groot is, namelijk circa 30%.



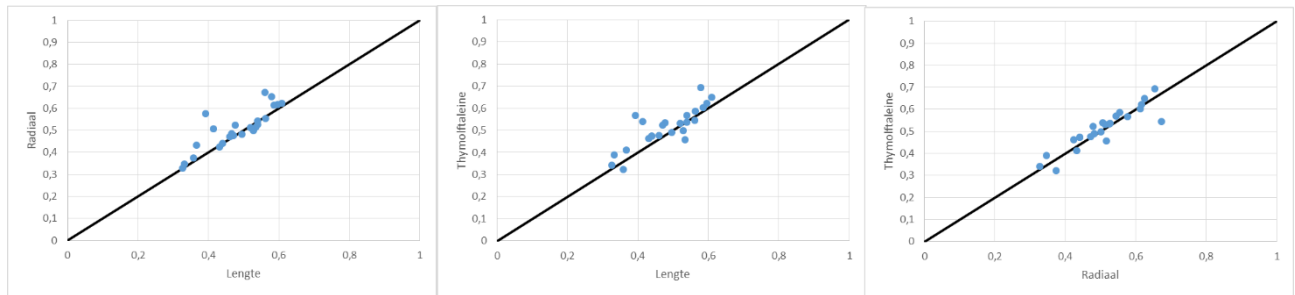
Figuur 15 Gemeten effectieve wanddikte in Cluster 25 op vier klokstanden met georadar in de lengterichting als percentage van de totale wanddikte. Tevens zijn de metingen met thymolftaleïne toegevoegd.

In Figuur 16 zijn de radiaalmetingen met georadar weergegeven en op de vier klokstanden de lengtemetingen met georadar en de thymolftaleïnemetingen. De gemiddelden komen op alle klokstanden relatief goed overeen met waarden tussen de 57% en 63%. Er is op alle klokstanden en in de radiaalrichting een grote spreiding.



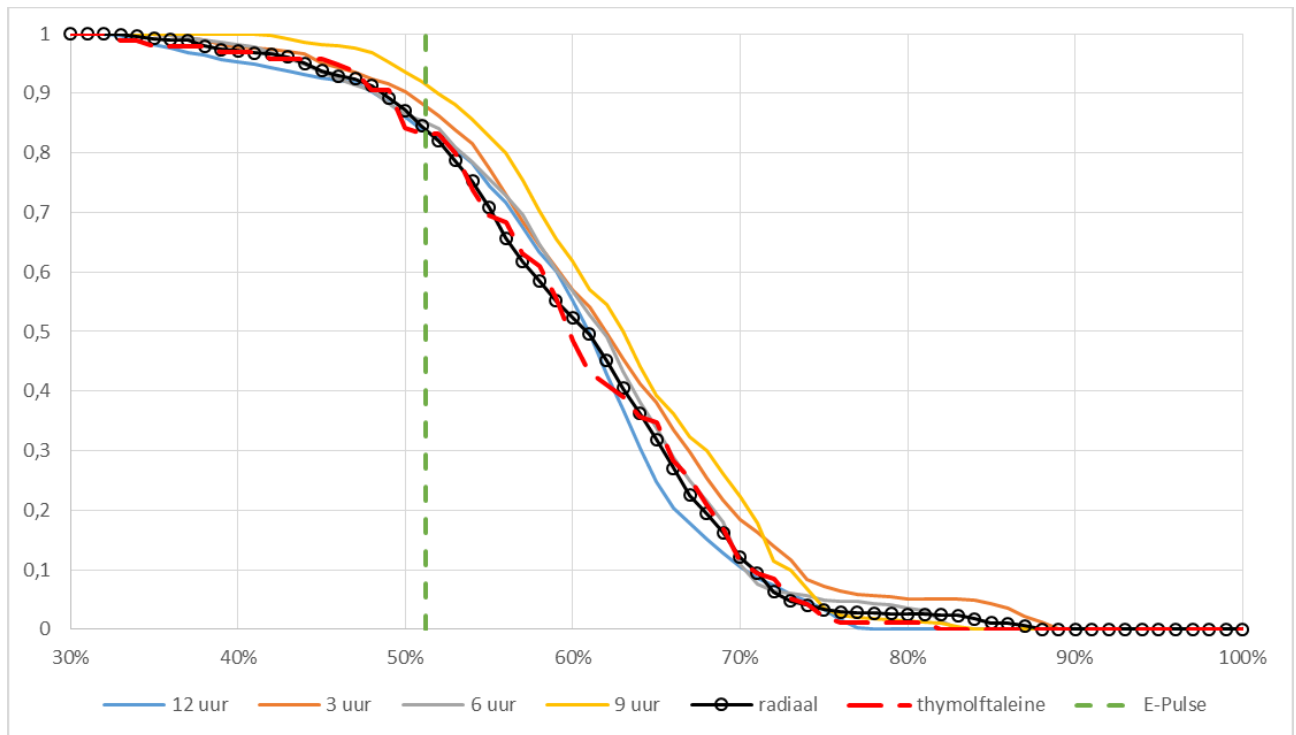
Figuur 16 Gemeten effectieve wanddikte in Cluster 25 in de radiaalrichting met georadar (GR) als percentage van de totale wanddikte. Tevens zijn op de vier klokstanden de metingen met georadar in de lengterichting (GL) en met thymolftaleïne (T) toegevoegd.

Voor buisdelen waar overeenkomstige metingen zijn uitgevoerd, zijn in Figuur minimum effectieve wanddikten vergeleken.



Figuur Gemeten minimum effectieve wanddikte van overeenkomende buisdelen. (Links: georadar lengterichting versus georadar radiaalrichting- N=24. Midden: georadar lengterichting versus thymolftaleïne-N=24. Rechts: Georadar lengterichting versus thymolftaleïne-N=24). De zwarte lijn verbindt gelijke waarden.

Uit Figuur - links blijkt dat de meeste minimum waarden met radiaalmetingen hoger zijn dan die van lengtemetingen. De maximum afwijking bedraagt circa 19%. Uit beide andere figuren blijkt dat de minimum waarden van thymolftaleïne metingen beter overeenkomen met radiaal metingen dan met lengtemetingen. Dit is logisch omdat deze metingen op dezelfde locatie zijn uitgevoerd.



Figuur 17 Cumulatieve frequentieverdeling van de metingen met georadar in de lengterichting over vier klokstanden, de meting met georadar in de radiaalrichting, de metingen met thymolftaleïne en de meting met ePulse. Op de y-as het aandeel en op de x-as de waarden per meting als percentage effectieve wanddikte.

In Figuur 17 zijn cumulatieve frequentieverdelingen gemaakt van alle uitgevoerde metingen op cluster 25. Overeenkomstig de voorgaande figuren, komt de verdeling van de waarden tussen de georadarmetingen en de thymolftaleïnemetingen vrij goed overeen. De minimum waarden zijn in alle gevallen aanzienlijk lager dan aangegeven met ePulse (51,2%).

4.2.5 Cluster 16, Morellenlaan

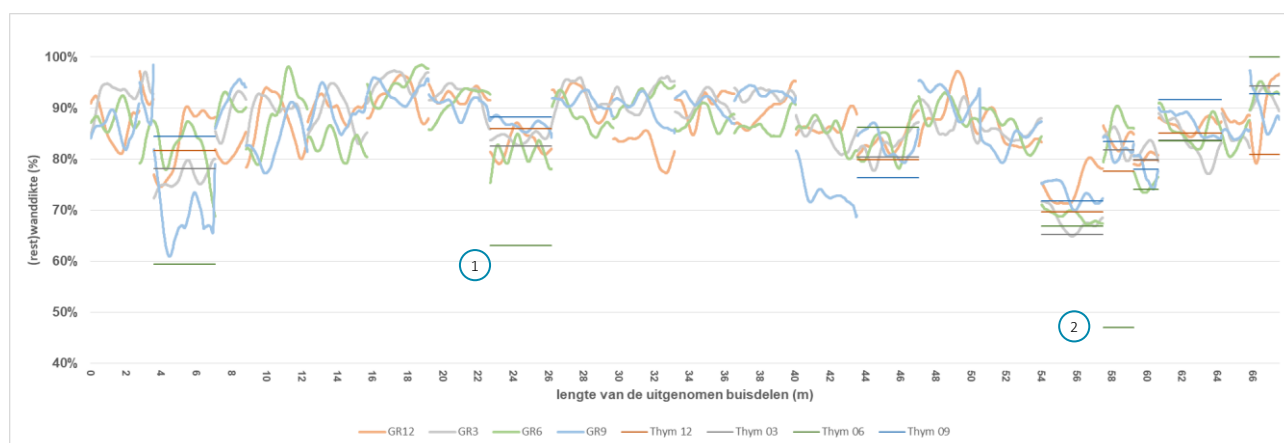
Cluster 16 bestaat uit 23 buisdelen. Er zijn georadarmetingen in de lengterichting uitgevoerd over 67,43 m. Op alle buisdelen is een radiaalmeting uitgevoerd met georadar. Op 8 buisdelen zijn op vier klokstanden thymolftaleïnemetingen uitgevoerd op dezelfde locatie waar radiaalmeting zijn uitgevoerd. Georadarmetingen in lengte- en radiaalrichting zijn uitgevoerd met een dichtheid van 100 metingen per meter.

Een overzicht van de meetwaarden is weergegeven in Tabel 9. De gemiddelde effectieve wanddikte gemeten met georadar in de lengterichting varieert tussen 85,6% en 86,9%. De gemiddelde waarde in de radiaalrichting betreft 86,3%. De gemiddelde effectieve wanddikte gemeten met thymolftaleïne betreft 79,2%. De minimum effectieve wanddikte gemeten met georadar in de lengterichting varieert tussen 61,0% en 71,3%. De minimumwaarde in de radiaalrichting betreft 63,0%. De minimum effectieve wanddikte gemeten met thymolftaleïne betreft 47,0%. De standaarddeviatie van de georadarmetingen in de lengterichting (6,6%) en in de radiaalrichting (7,3%) is ongeveer gelijk. De standaarddeviatie van de thymolftaleïnemetingen (10,5%) is aanzienlijk hoger, wat duidt op een grotere spreiding van meetresultaten.

Tabel 9 Overzicht meetwaarden Cluster 16, Morellenlaan

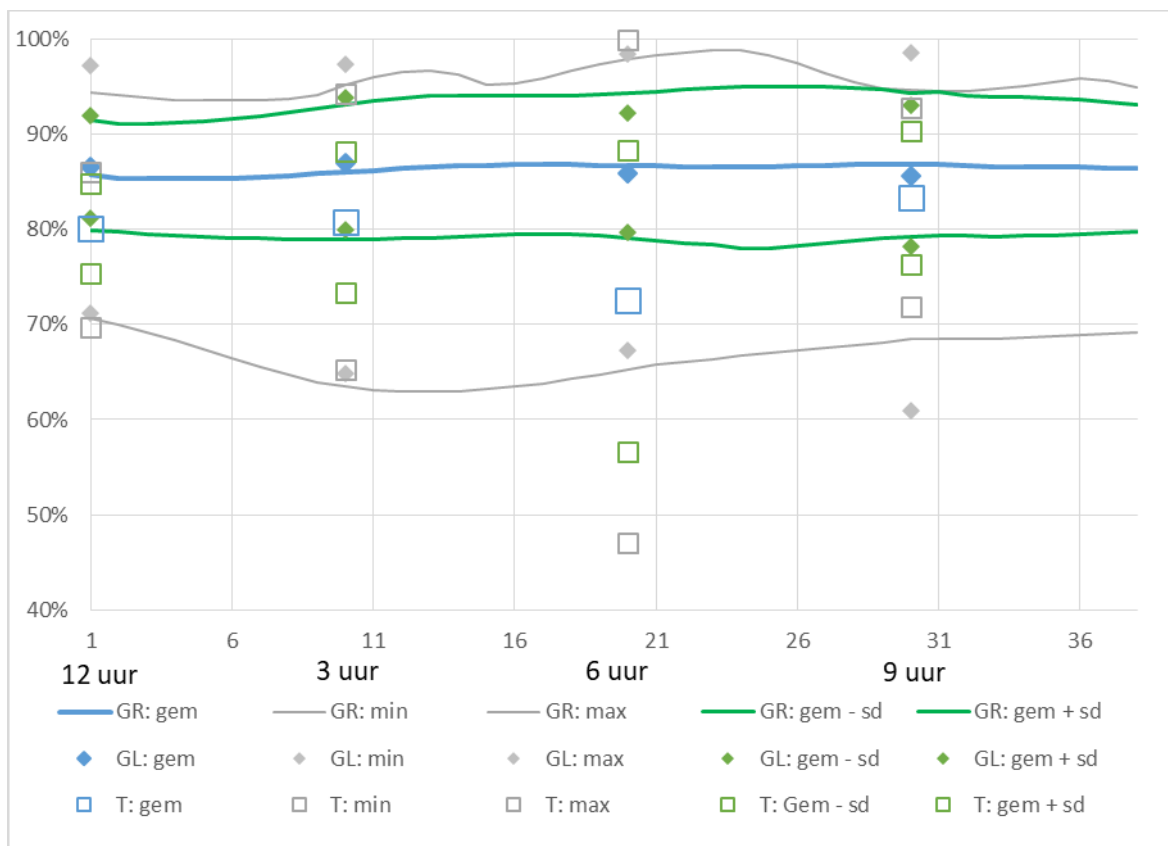
	Georadarmeting, klokstand					Georadar, radiaal	Thymolftaleïnemeting			
	12 uur	3 uur	6 uur	9 uur	Gem.		Uitl. inw.	Uitl. uitw.	Wandd.	Perc. uitl.
N	6766	6766	6766	6766	27064	911	32	32	32	32
Min	71,3%	64,8%	67,3%	61,0%	61,0%	63,0%	5,0	4,6	14,0	47,0%
Max	97,3%	97,3%	98,4%	98,5%	98,5%	98,9%	0,0	0,0	10,7	100,0%
Gem	86,6%	86,9%	86,0%	85,6%	86,3%	86,3%	2,0	0,6	12,3	79,2%
SD	5,4%	6,9%	6,3%	7,5%	6,6%	7,3%				10,5%

In Figuur 18 zijn alle lengtemetingen met georadar weergegeven en de thymolftaleïnemetingen. Voor een groot deel van de onderzochte buizen geldt dat de waarden gemeten met georadar in de lengterichting redelijk overeenkomen met de met thymolftaleïne gemeten waarden. Voor punten 1 en 2 geldt echter dat de thymolftaleïnemetingen aanzienlijke lagere waarden aangeven dan de georadarmetingen. In Bijlage II is een foto weergegeven van de buis met de laagste waarde gemeten met de thymolftaleïne. Vanwege de ongelukkige uitsnede van de foto is de minimum waarde moeilijk te verifiëren. Opvallend op deze foto is een uitloging aan de buitenzijde die zich bevindt op circa '8 uur' en die op '9 uur' niet meer aanwezig lijkt. Het is mogelijk dat de meting op '6 uur' in werkelijk op deze plek is uitgevoerd.



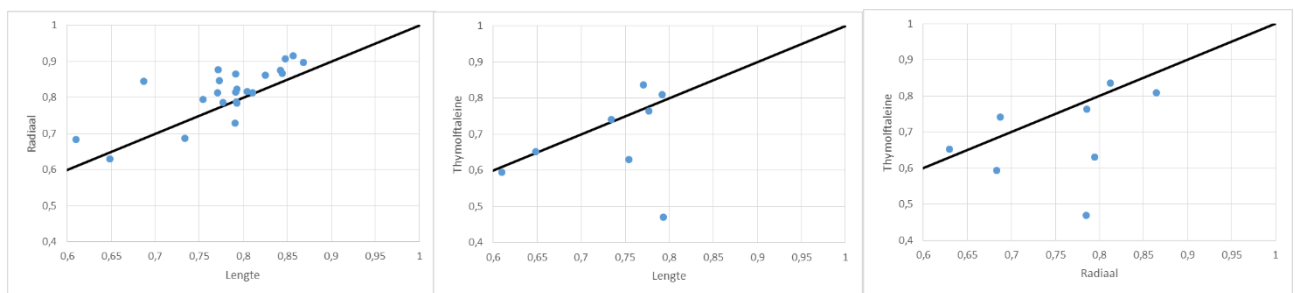
Figuur 18 Gemeten effectieve wanddikte in Cluster 16 op vier klokstanden met georadar in de lengterichting als percentage van de totale wanddikte. Tevens zijn de metingen met thymolftaleïne toegevoegd.

In Figuur 19 zijn de radiaalmetingen met georadar weergegeven en op de vier klokstanden de lengtemetingen met georadar en de thymolftaleïnemetingen. De meetwaarden van de georadar metingen (radiaal- en lengterichting) komen relatief goed overeen. Op '6 uur' geeft de thymolftaleïnemeting aanzienlijk lagere waarden dan beide georadarmetingen. Dit wordt veroorzaakt door de metingen op de punten 1 en 2 van Figuur 18.



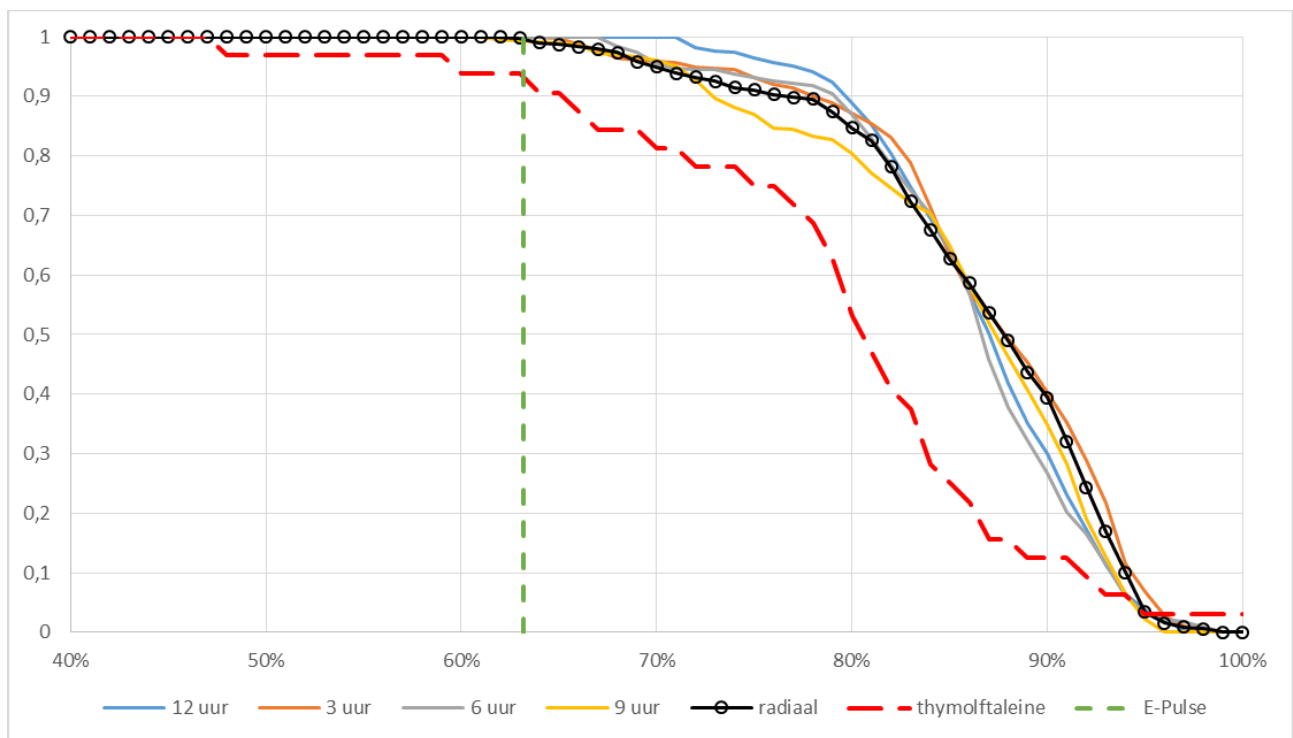
Figuur 19 Gemeten effectieve wanddikte in Cluster 30 in de radiaalrichting met georadar (GR) als percentage van de totale wanddikte. Tevens zijn op de vier klokstanden de metingen met georadar in de lengterichting (GL) en met thymolftaleïne (T) toegevoegd.

Voor buisdelen waar overeenkomstige metingen zijn uitgevoerd, zijn in Figuur 20 minimum effectieve wanddikten vergeleken.



Figuur 20 Gemeten minimum effectieve wanddikte van overeenkomende buisdelen. (Links: georadar lengterichting versus georadar radiaalrichting- N=23. Midden: georadar lengterichting versus thymolftaleïne-N=8. Rechts: Georadar lengterichting versus thymolftaleïne-N=8). De zwarte lijn verbindt gelijke waarden.

Uit Figuur 20 - links blijkt dat de meeste minimum waarden met radiaalmetingen hoger zijn dan die van lengtemetingen. De maximum afwijking bedraagt circa 16%. Uit beide andere figuren blijkt dat een buisdeel waar thymolftaleïnemetingen een lage effectieve wanddikte aangeven, dit niet wordt onderkend met georadar. De afwijking met een lengtemeting en een radiaalmeting bedraagt respectievelijk 32% en 31%.



Figuur 21 Cumulatieve frequentieverdeling van de metingen met georadar in de lengterichting over vier klokstanden, de meting met georadar in de radiaalrichting, de metingen met thymolftaleïne en de meting met ePulse. Op de y-as het aandeel en op de x-as de waarden per meting als percentage effectieve wanddikte.

In Figuur 21 zijn cumulatieve frequentieverdelingen gemaakt van alle uitgevoerde metingen op cluster 16. Overeenkomstig de voorgaande figuren, komt de verdeling van de waarden tussen de georadarmetingen in de lengterichting en de radiaalrichting goed overeen. De thymolftaleïnemetingen geven aanzienlijk kleinere effectieve wanddikten aan. De minimum waarden van de georadarmetingen komen overeen met de door ePulse aangegeven waarde (63,2%). Die van de thymolftaleïnemetingen zijn aanzienlijk lager dan aangegeven met ePulse.

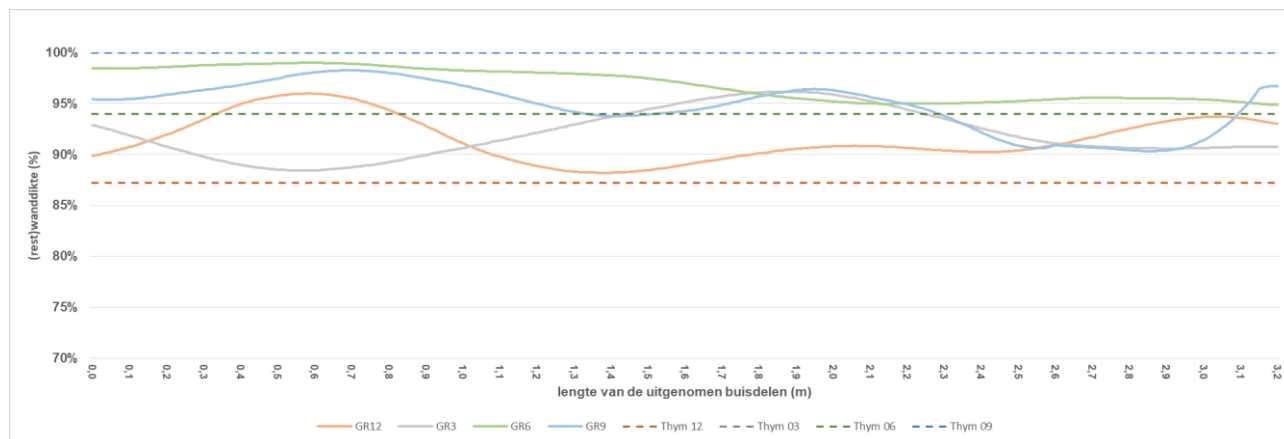
4.2.6 Cluster 24, Raadsherenveld

Cluster 24 bestaat uit slechts één buisdeel. Er zijn georadarmetingen in de lengterichting uitgevoerd over 3,19 m. Op het buisdeel is een radiaalmeting uitgevoerd met georadar en er zijn op vier klokstanden thymolftaleïnemetingen uitgevoerd op dezelfde locatie. Georadarmetingen in lengterichting zijn uitgevoerd met een dichtheid van 100 metingen per meter. In radiaalrichting met een dichtheid van 200 metingen per meter.

Een overzicht van de meetwaarden is weergegeven in Tabel 10 en Figuur 22. De gemiddelde effectieve wanddikte gemeten met georadar in de lengterichting varieert tussen 91,5% en 96,9%. De gemiddelde waarde in de radiaalrichting betreft 93,6%. De gemiddelde effectieve wanddikte gemeten met thymolftaleïne betreft 95,3%. De minimum effectieve wanddikte gemeten met georadar in de lengterichting varieert tussen 88,2% en 94,9%. De minimumwaarde in de radiaalrichting betreft 89,5%. De minimum effectieve wanddikte gemeten met thymolftaleïne betreft 87,2%. De standaarddeviatie van de georadarmetingen in de lengterichting (3,0%) en in de radiaalrichting (2,6%) zijn ongeveer gelijk. De standaarddeviatie van de thymolftaleïnemetingen (5,3%) is hoger, wat duidt op een grotere spreiding van meetresultaten.

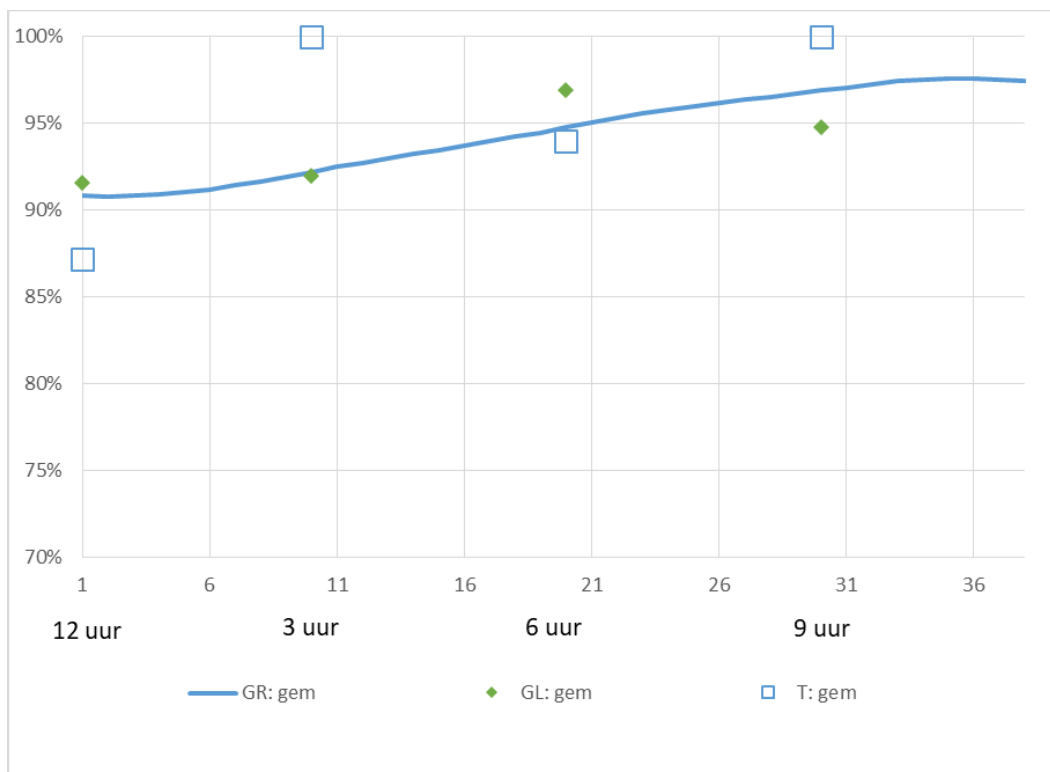
Tabel 10 Overzicht meetwaarden Cluster 24, Raadsherenveld

	Georadarmeting, klokstand					Georadar, radiaal	Thymolftaleïnemeting			
	12 uur	3 uur	6 uur	9 uur	Gem.		Uitl. inw.	Uitl. uitw.	Wandd.	Perc. uitl.
N	321	321	320	321	1284	80	4	4	4	4
Min	88,2%	88,4%	94,9%	90,3%	88,2%	89,5%	1,7	0,0	13,1	87,2%
Max	96,0%	96,2%	99,0%	98,2%	99,0%	97,6%	0,0	0,0	12,8	100,0%
Gem	91,5%	92,0%	96,9%	94,7%	93,8%	93,6%	0,6	0,0	12,9	95,3%
SD	2,2%	2,3%	1,5%	2,4%	3,0%	2,6%				5,3%



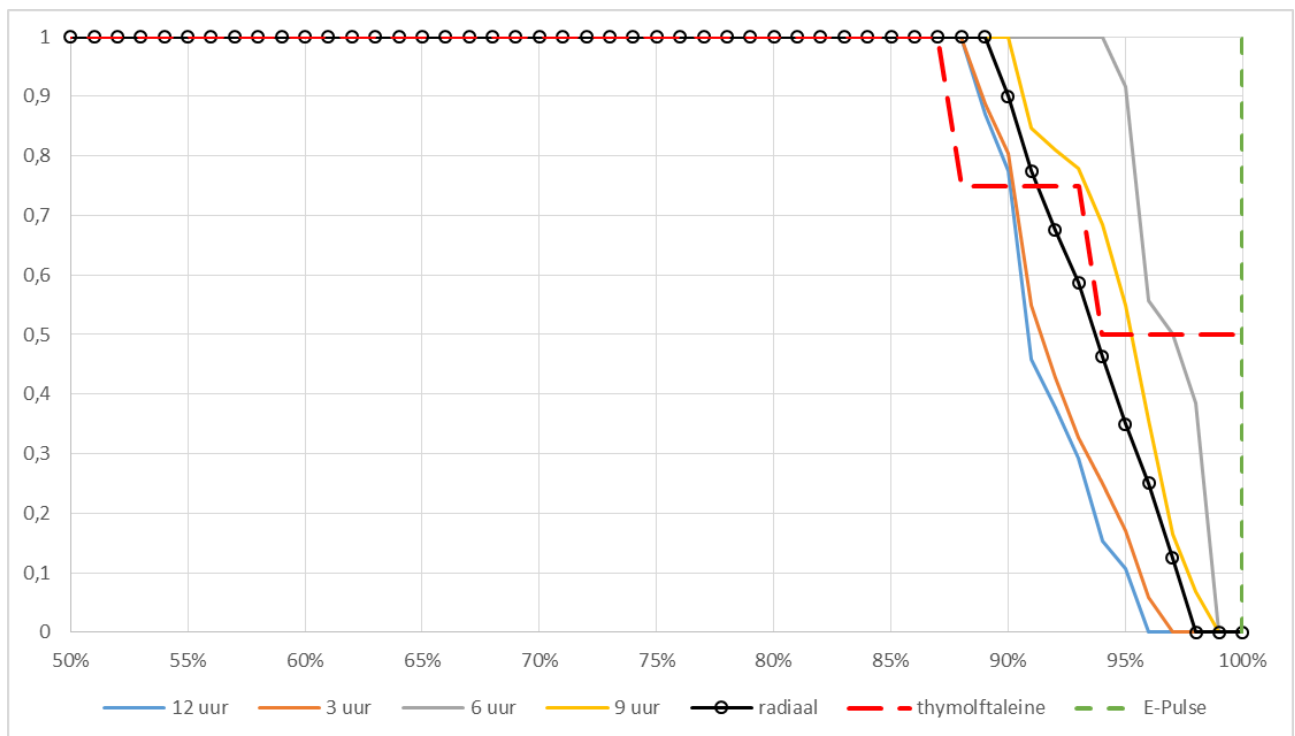
Figuur 22 Gemeten effectieve wanddikte in Cluster 24 op vier klokstanden met georadar in de lengterichting als percentage van de totale wanddikte. Tevens zijn de metingen met thymolftaleïne toegevoegd. In deze figuur hebben de thymolftaleïnemetingen betrekking op slechts één meting. De meting op klokstand 3 en klokstand 9 hebben beide een waarde van 100% (geen uitloging)

In Figuur 23 zijn de radiaalmetingen met georadar weergegeven en op de vier klokstanden de lengtemetingen met georadar en de thymolftaleïnemetingen. Omdat dit slechts één buis betreft zijn hier alleen de gemiddelden waarden gepresenteerd. Opvallend is dat op de klokstanden '3 uur' en '9 uur' geen uitloging met thymolftaleïne is geconstateerd, terwijl er met georadar een beperkte uitloging is gemeten.



Figuur 23 Gemeten effectieve wanddikte in Cluster 118 in de radiaalrichting met georadar (GR) als percentage van de totale wanddikte. Tevens zijn op de vier klokstanden de metingen met georadar in de lengterichting (GL) en met thymolftaleïne (T) toegevoegd.

Omdat er slechts één buis is onderzocht van dit cluster is het niet zinvol een analyse uit te voeren tussen de verschillende buisdelen, zoals is gedaan in onder andere Figuur 20.



Figuur 24 Cumulatieve frequentieverdeling van de metingen met georadar in de lengterichting over vier klokstanden, de meting met georadar in de radiaalrichting, de metingen met thymolftaleïne en de meting met ePulse. Op de y-as het aandeel en op de x-as de waarden per meting als percentage effectieve wanddikte.

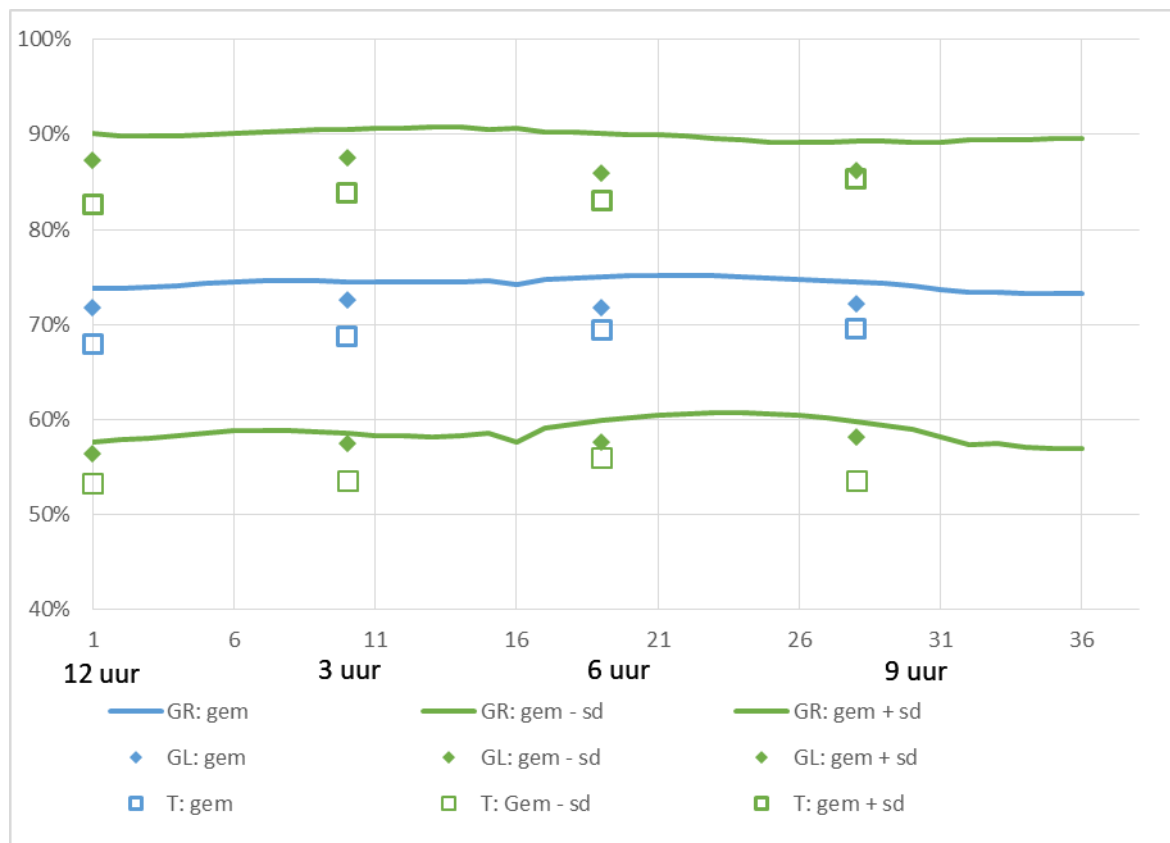
In Figuur 24 zijn cumulatieve frequentieverdelingen gemaakt van alle uitgevoerde metingen op cluster 24. Omdat de waarden van de georadar en thymolftaleïne metingen slechts betrekking hebben op één buisdeel kennen de verdelingen een ander (grilliger) verloop dan de overige cumulatieve frequentie verdelingen. De weergegeven waarden zijn lager dan de meting met ePulse. Opgemerkt wordt dat de meting met ePulse hier over een leidinglengte van 86 meter is uitgevoerd, waarvan dit buisdeel onderdeel was.

4.3 Overige vergelijkingen van meetwaarden

Om na te gaan of er een systematisch patroon is te ontdekken van de meetwaarden over de omtrek van de leiding, zijn in Figuur 25 de gemiddelde radiaalwaarden voor alle buisdelen en van alle clusters weergegeven. Deze gemiddelde waarde blijkt vrij constant te zijn in de omtrekrichting. Ook de waarden die wordt gegeven door het gemiddelde te verminderen en te vermeerderen met de standaarddeviatie blijkt redelijk constant.

In Figuur 25 is dit tevens weergegeven voor de gemiddelde waarde van alle thymolftaleïnemetingen en alle georadarmetingen in de lengterichting. Ook hier blijken de gemiddelde waarden relatief constant in de omtrekrichting. Dit geldt ook voor de gemiddelden vermeerderd en verminderd met de standaarddeviatie.

In Figuur 25 is tevens te zien dat de gemiddelde meetwaarden gemeten met georadar in de radiaalrichting hoger zijn dan de gemiddelde meetwaarden gemeten met georadar in de lengterichting, die weer hoger zijn dan de gemiddelde meetwaarden met thymolftaleïne. Op de vier klokstanden zijn de georadarmetingen in de radiaalrichting 7% tot 9% hoger dan de thymolftaleïnemetingen. De georadarmetingen in de lengterichting zijn 3% tot 6% hoger dan de thymolftaleïnemetingen.



Figuur 25 Gemeten effectieve wanddikte voor alle buisdelen in de radiaalrichting met georadar (GR) als percentage van de totale wanddikte. Tevens zijn op de vier klokstanden de metingen met georadar in de lengterichting (GL) en met thymolftaleïne (T) toegevoegd.

Met thymolftaleïne is onderscheid te maken tussen inwendige en uitwendige uitloging. In Tabel 11 zijn per leiding de gemiddelde waarden weergegeven. Opvallend is dat de gemiddelde uitwendige uitloging van alle buizen 0,66 mm bedraagt en de gemiddelde inwendige uitloging 2,98 mm. De verschillen per leiding zijn ook hier opvallend groot.

Tabel 11 Gemeten gemiddelde inwendige en uitwendige uitloging (mm) met thymolftaleïne.

Techniek	Cluster 31	Cluster 30	Cluster 118	Cluster 25	Cluster 16	Cluster 24	Alle buizen
inwendige uitloging	0,69	3,04	4,07	5,01	2,01	0,61	2,98
uitwendig uitloging	0,79	0,00	0,65	0,05	0,59	0,00	0,66

5 Discussie

5.1 Bespreking van de meetmethoden en resultaten

In paragraaf 2.4 zijn de eisen voor het beoordelen van toestandsmetingen genoemd namelijk nauwkeurigheid en meetdichtheid. Tevens is gesteld dat van de drie geëvalueerde toestandsbepalingmethoden ePulse wordt gezien als het minst nauwkeurig met de laagste meetdichtheid, dat georadar de hoogste meetdichtheid heeft en dat thymolftaleïne de grootste nauwkeurigheid heeft. De vergelijkingen van de metingen in Apeldoorn ondersteunen deze eerdere constatering.

Voor de ePulse metingen geldt dat deze een gemiddelde effectieve wanddikte geeft over een grotere lengte. Echologics heeft 48 metingen uitgevoerd die zijn beoordeeld op basis van de gemeten gemiddelde effectieve wanddikte (Echologics, 2017). In de zes metingen die zijn gevalideerd met georadar en thymolftaleïne blijken de metingen van ePulse een aanzienlijk lagere uitlogging te registreren.

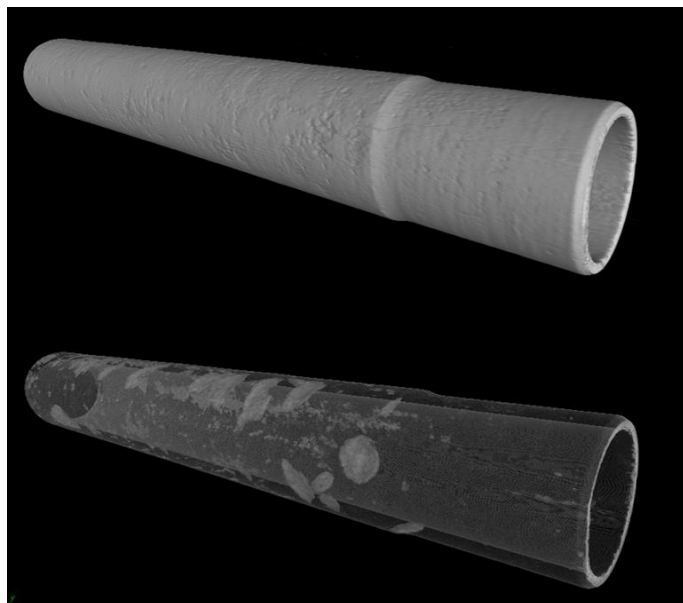
- Voor vier leidingen werd geen of een beperkte uitlogging geconstateerd (<10%). Eén van de vier betrof cluster 24 (Raadsherenveld) waar met ePulse voor de gehele leiding geen uitlogging werd gemeten. Georadar en thymolftaleïne tonen echter aan dat in deze buis een beperkte maatgevende uitlogging aanwezig is, variërend van 10-13%.
- Voor 25 leidingen is een middelgrote uitlogging geconstateerd (10-30%), waaronder voor de clusters 31 (Haringvliet) en 30 (Vechtstraat³). De gemeten uitlogging bedroeg hier respectievelijk 25% en 30%. Georadar toont voor cluster 31 een maatgevende uitlogging aan van circa 25% en met thymolftaleïne van 44%. Voor cluster 30 tonen georadar en thymolftaleïne een maatgevende uitlogging aan van circa 40%.
- Voor 19 leidingen is een grote uitlogging geconstateerd (>30%), waaronder de clusters 118, 25 en 16. De gemeten uitlogging bedroeg hier respectievelijk 46%, 49% en 37%. Georadar toont voor cluster 118 een maatgevende uitlogging aan van circa 86% in de lengterichting en 78% in de radiaalrichting en met thymolftaleïne van 83%. Georadar en thymolftaleïne tonen voor cluster 25 een maatgevende uitlogging aan van circa 68% van 83%. Georadar toont voor cluster 16 een maatgevende uitlogging aan van circa 38% en met thymolftaleïne van 53%.

De uitgevoerde evaluatie laat zien dat het zeer beperkt mogelijk is om met de meting van de gemiddelde effectieve wanddikte van ePulse die maatgevende plekken te vinden met de grootste uitlogging en die daardoor maatgevend zijn voor de betreffende leiding. Dit komt overeen met de bevindingen van Laarhoven en van Summeren (2019) die met CT-scans aantonen dat de uitlogging van AC-buizen een zeer inhomogeen karakter kan hebben (zoals geïllustreerd in Figuur 26). Een ander nadeel van de metingen met ePulse is dat er uitgegaan moet worden van de wanddikte zoals die bekend is van cataloguswaarden en die in de praktijk sterk kunnen afwijken. De cataloguswaarde van de wanddikte van de AC-buizen die zijn beschouwd in dit onderzoek bedraagt 12,5 mm. In de praktijk zijn wanddikten aangetroffen die variëren tussen 10,4 en 16,5 mm (gemeten met de schuifmaat). Een ander nadeel van deze techniek is dat de effectieve wanddikte indirect wordt gemeten. De meting meet geluidsgolven en vervolgens wordt de gemiddelde wanddikte berekend met materiaalparameters zoals de elasticiteitsmodulus, die geschat moet worden.

Gegeven de genoemde bezwaren kan gesteld worden dat de ePulse methode te onnauwkeurig is als onderbouwing voor vervangingsbeslissingen van AC-leidingen. Dit weerlegt de constatering die eerder is gemaakt door Beuken, et al. (2013) waar een meting is beschreven met dezelfde meetmethoden en van kleinere omvang op een buis die zeer beperkt was uitgelogd. De techniek kan hooguit worden ingezet als quick-scan. Het is echter de vraag of er

³ In Echologics (2017) omschreven als Rijnstraat.

voldoende aanvullende informatie wordt verkregen boven reeds bekende informatie zoals het jaar van aanleg, storingsgegevens en expertkennis.



Figuur 26 Resultaten van een meting van de effectieve wanddikten van een AC-buis met een CT-scan (van Laarhoven en van Summeren, 2019)

De metingen met georadar, en dan met name in de lengterichting, zijn met de grootste meetdichtheid uitgevoerd. De meetdichtheid met georadar bedraagt 100 of 200 metingen per meter, ten opzichte van 4 metingen met thymolftaleïne per buis. Toch geldt voor twee van de zes leidingen (cluster 31 en 16) dat de thymolftaleïnemetingen aanzienlijk lagere maatgevende (minimum) effectieve wanddikten opleveren dan georadar (zie Tabel 12). Dit is ook te zien in Figuur 25 waar het gemiddelde van alle meetwaarden per klokstand zijn vergeleken en waar blijkt dat de georadarmeting in de radiaalrichting significant hoger is dan de georadarmeting in de lengterichting, die weer significant hoger is dan de thymolftaleïnemeting. Vergelijking van metingen over de lengterichtingen (Figuur 3, Figuur 7, etc.) van de leidingen laten zien dat soms georadar en soms thymolftaleïne delen met grote uitloging identificeren die niet door de andere techniek wordt aangetroffen. De meest logische verklaring hiervoor is dat bij georadar de nauwkeurigheid om lokale en extreme uitloging te constateren beperkend is en dat bij thymolftaleïne de meetdichtheid om lokale en extreme uitloging te constateren beperkend is. De verschillen bij cluster 31 en 16 laten zien dat in zijn geheel gezien de onvolkomenheden van georadar aanzienlijk groter zijn dan van thymolftaleïne. Deze constatering komt overeen met één van de bevindingen van van Laarhoven en van Summeren (2019) die luidt dat georadar de aantasting van AC-buizen systematisch onderschat.

Tabel 12 Overzicht van de maatgevende effectieve wanddikte als percentage van de totale wanddikte.

	Cluster 31	Cluster 30	Cluster 118	Cluster 25	Cluster 16	Cluster 24
Jaar van aanleg	1962	1962	1963	1966	1971	1975
EPulse:	75,2%	69,6%	54,4%	51,2%	63,2%	100%
GR-lengte:	74,2%	57,1%	13,5%	32,6%	61,0%	88,2%
GR rad:	75,2%	61,9%	22,4%	32,8%	63,0%	89,5%
Thymolft:	55,8%	59,0%	17,2%	32,2%	47%	87,2%

Zowel voor de georadarmetingen als voor de thymolftaleïnemetingen zijn de buizen verkregen bij uitname voor vervanging (exitbeoordelingen). Gegeven de hogere inspanningen en kosten voor het uitvoeren van georadarmetingen, met name in de hiervoor specifiek ingerichte meetruimte, lijkt er geen meerwaarde voor georadar boven thymolftaleïne. Een bijkomend voordeel van de thymolftaleïnetest is dat er in tegenstelling tot georadar ook onderscheid gemaakt kan worden naar inwendige en uitwendige uitloging. Verder zijn de kosten van thymolftaleïne aanzienlijk lager omdat de meting op locatie kan worden uitgevoerd, iets wat voor georadar vooralsnog niet mogelijk is. Een belangrijk aandachtspunt bij het uitvoeren van een thymolftaleïnemeting is de werkwijze, metingnauwkeurigheid en handmatige registratie. Gegevens kunnen alleen meerwaarde opleveren als deze worden uitgevoerd door gekwalificeerd en gemotiveerd personeel, werkend met duidelijke werkinstructies.

5.2 Exitbeoordelingen, nuttig of niet?

Een vraag die samenhangt met het onderzoek naar deze leidingen en de gehanteerde meetmethode, is of er meerwaarde is voor exitbeoordelingen. Het antwoord op deze vraag hangt af van meerdere factoren, waaronder de benodigde inspanning en de vraag of er betere alternatieven zijn om vervangingsbeslissingen te onderbouwen. Uitgaande van exitbeoordelingen met thymolftaleïne die aan de sleuf worden uitgevoerd, pleiten de volgende argumenten voor het uitvoeren:

- buizen voor onderzoek komen bij werkzaamheden beschikbaar;
- de inspanningen/kosten zijn gering;
- thymolftaleïnemetingen hebben een hoge betrouwbaarheid;
- de daadwerkelijke wanddikte van de leidingen kan worden bepaald;
- er zijn vooralsnog nauwelijks alternatieven om kennis op te bouwen over de toestand van AC-leidingen.

Argumenten die tegen de uitvoering van exitbeoordelingen met thymolftaleïne pleiten zijn:

- het beperkt aantal mogelijke metingen (lage meetdichtheid) maakt dat het onzeker is of de maatgevende uitloging wordt aangetroffen;
- vanwege het inhomogene karakter van de uitloging van AC en de beperkte mogelijkheden om relaties aan te tonen tussen uitloging en voorspellende parameters (zoals leeftijd, waterkwaliteit en bodemgesteldheid), zijn de resultaten van exitbeoordelingen moeilijk vertaalbaar naar andere leidingen;
- bij de uitvoering van thymolftaleïnetesten kunnen meetfouten optreden bij het selecteren, aflezen en registreren, wat betekent dat er een nauwkeurige werkwijze gevolgd dient te worden.

In Bedrijfsonderzoek dat in 2015 en 2016 is uitgevoerd voor WML (Beuken, 2016) is aanbevolen om geen exitbeoordelingen meer uit te voeren met thymolftaleïne en juist over te gaan op het uitnemen van AC-leidingen voor de beproeving met georadar op een specifiek in te richten proflocatie, gebaseerd op de werkwijze van Brabant Water. Gezien de geconstateerde onvolkomenheden van georadar, is deze aanbeveling niet meer geldig. Bij afwezigheid van alternatieven om kennis te verzamelen over de toestand en veroudering van AC-leidingen is het te overwegen om op beperkte schaal exitbeoordelingen uit te voeren. Hierbij wordt gedacht aan het vergelijken van gemeenten met verschillende typen AC en liggingssomstandigheden, om zo toch inzichten te krijgen in de toestand van AC-leidingen en de vraag of vervanging op grond van de toestand noodzakelijk was. Bij deze overweging dienen ook de aanbevelingen van Agudelo-Vera en Blokker (2018) in ogenschouw te worden betrokken. Zij geven voor een specifieke doorrekening aan dat de grootste kostenvoordelen zijn te behalen door grootschalige wijkgerichte vervanging. Er is een reductie van kosten en OLM berekend van 6-16% bij vervanging van specifieke buizen voordat deze storen. Dit geeft inzicht in de financiële ruimte die er potentieel is voor metingen of voorspelling van de toestand. Opgemerkt wordt dat de inzichten die exitbeoordelingen kunnen opleveren onvoldoende specifiek zijn om individuele buizen te selecteren voor vervanging.

Bij het uitvoeren van exitbeoordelingen is het belangrijk om gestructureerd en nauwkeurig te werk te gaan, bij voorkeur met gespecialiseerde monteurs. Om voldoende representativiteit te verkrijgen wordt aanbevolen om per

leiding meerdere buizen te onderzoeken en per buis op meerdere breukvlakken een test uit te voeren. Als voorbeeld zou voor de hier onderzochte metingen op vijf leidingen, drie buizen onderzocht kunnen worden op drie verschillende breukvlakken. Dit betreft in totaal 45 metingen. Als de buizen op het werk apart worden gelegd en worden gelabeld, kan dit door twee monteurs in een dag worden uitgevoerd.

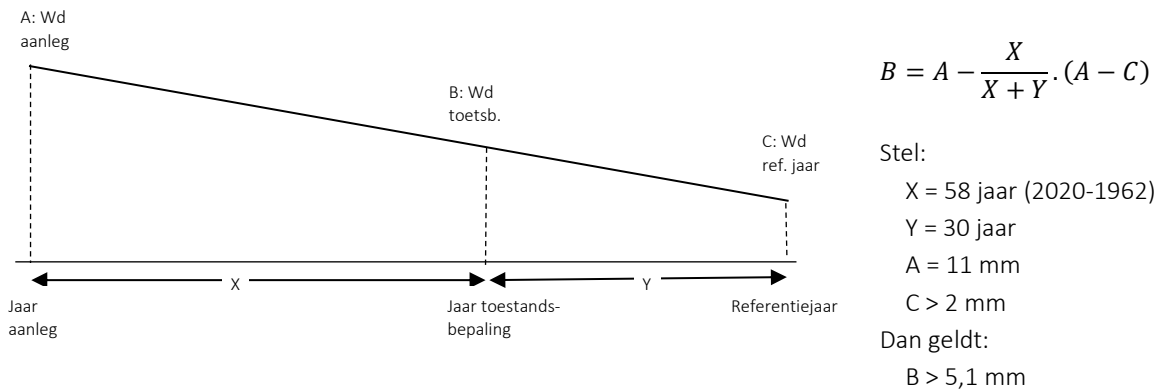
5.3 Toepassing van meetresultaten voor selectie van leidingen voor vervanging

In Hoofdstuk 4 is een overzicht gegeven van de meetresultaten op zes clusters van leidingen van toestandsbepalingen met georadar thymolftaleïne en ePulse. Vitens wil met dit onderzoek nagaan welke meetmethode het best toepasbaarheid is voor het prioriteren van leidingen voor vervanging. Daarvoor is het noodzakelijk dat leidingen met een grotere kans op lekkage als eerste worden vervangen en leidingen met de kleinste kans als laatste. Bij het opstellen van vervangingsprojecten zal ook het aspect van een schaalgrootte een rol spelen. In de praktijk betekent dat dat op niveau van straten (ordegrootte 100 meter) een uitspraak moet worden gedaan over vervanging. In deze praktijkproef heeft Vitens de toestand bepaald van vijf clusters met een vergelijkbare lengte. De periode van aanleg van de leidingen varieert tussen 1962 en 1971. Voor alle leidingen geldt dat de liggingssituatie niet onderscheidend is (zie ook Tabel 3). Dit wil zeggen dat op basis van informatie uit het LIS er buiten de aanlegperiode geen onderscheidend criterium is voor het nemen van een saneringsbeslissing. In werkelijkheid spelen meerder factoren een rol bij het bepalen of een leiding een hogere kans heeft op falen, bijvoorbeeld als op bepaalde locaties wortels om een buis zijn gegroeid of er een bijzondere bovenbelasting wordt aangebracht (een zandhoop of een zware vrachtwagen). Dit betreffen echter onvoorspelbare gebeurtenissen die niet in de afweging voor vervanging worden meegenomen. Een andere reden voor het vervangen van een specifieke groep leidingen kan zijn het aanwezig zijn van slechte (i.c. natuurrubber) verbindingsringen. Dit is echter in deze praktijkproef niet aan de orde. Een ander betekent dat de kans op een storing als gevolg van uitloging de voornaamste (en eigenlijk de enige) indicator is voor de kans op lekkage.

Om de leidingen te identificeren met de hoogste kans op een storing is het noodzakelijk die leidingen te identificeren met (de meeste) locaties waar de effectieve wanddikte lager is dan de vereiste wanddikte met oog op de optredende wandspanningen. Comsima is een rekenprogramma waarmee de belastingen op leidingen kunnen worden vertaald in een optredende wandspanning en waarmee de minimaal benodigde wanddikte berekend kan worden. Voor de leidingen in deze praktijkproef bedraagt de minimaal benodigde wanddikte 2,0 mm, waarbij gebruik is gemaakt van een berekening met de volgende uitgangspunten: AC 100 mm, inwendige druk 0,45 MPa, diepte ligging van 1,0 m in een zandbodem met een grondwaterspiegel lager dan de diepte van de buis en een verkeersklasse die betrekking heeft op een weg in een woonwijk.

Bij het bepalen of een leiding wel of niet wordt vervangen is het noodzakelijk dat een leiding gedurende een referentietijd, bijvoorbeeld 30 jaar, niet zal bezwijken. Daarom is niet de huidige effectieve wanddikte maatgevend maar de effectieve wanddikte over, in dit voorbeeld, 30 jaar. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 27 waarbij in overeenstemming met de gehanteerde veroudering in Comsima (zie Wols en Moerman, 2017) wordt uitgegaan van een constante uitloging over de leeftijd van de buis in mm per jaar⁴. Voor cluster 31 geldt dat het jaar van aanleg 1962 is. Voor de wanddikte bij aanleg wordt 11 mm aangehouden, de waarde die overeenkomt, met de gemiddelde wanddikte gemeten met een schuifmaat in Tabel 4. Als verder een benodigde wanddikte geldt over 30 jaar van 2 mm, dan bedraagt de benodigde wanddikte tijdens de meting 5,1 mm (46%).

⁴ In het lopende BTO Bedrijfsonderzoek 'Een model van de invloed van de drinkwatersamenstelling op uitloging van cementshoudende leidingen' laten voorlopige resultaten zien dat er twijfels zijn of uitloging een lineair proces is. Dit vergt echter nader onderzoek. Bij gebrek aan voldoende kennis hanteren we daarom een lineair verband.



Figuur 27 Bepaling van de effectieve wanddikte in het referentiejaar voor Cluster 31

In Tabel 13 is een overzicht gegeven van de benodigde wanddikte ten tijde van de meting van de vijf clusters en het aantal metingen dat hier niet aan voldoet. Cluster 24 dat slechts uit één buis bestaat is hier buiten beschouwing gelaten.

Tabel 13 Vergelijking bepaling wel of niet vervangen met diverse methoden van toestandsbepaling. Volgens deze benadering zouden de rood gemarkeerde clusters vervangen moeten worden.

	Cluster 31	Cluster 30	Cluster 118	Cluster 25	Cluster 16
Beproefde lengte (m)	90,2	79,2	83,0	68,9	67,4
Jaar van aanleg	1962	1962	1963	1966	1971
Wanddikte bij aanleg (mm)	11,0	13,5	11,7	12,5	12,0
Benodigde wanddikte tijdens proef (mm en %)	5,1 mm 46%	5,9 mm 44%	5,3 mm 46%	5,8 mm 46%	5,8 mm 48%
Aantal metingen met een te lage wanddikte					
ePulse:	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
Georadar-lengte:	0/36197	0/63495	7245/66528 11%	3199/55100 6%	0/27064
Georadar-radiaal:	0/1323	0/2060	360/2614 14%	133/1886 7%	0/911
Thymolftaleïne:	0/44	0/104	22/136 16%	5/95 5%	1/32 3%

Op basis van de meetresultaten en de berekende benodigde effectieve wanddikte zou het advies op basis van de inzet van de verschillende toestandsbepalingmethoden zijn:

- ePulse, geen van de leidingen behoeft vervanging;
- Georadar - lengtemeting, vervanging van cluster 118 en 25;
- Georadar - radiaalmeting, vervanging van cluster 118 en 25;
- Thymolftaleïne, vervanging van cluster 118, 25 en 16

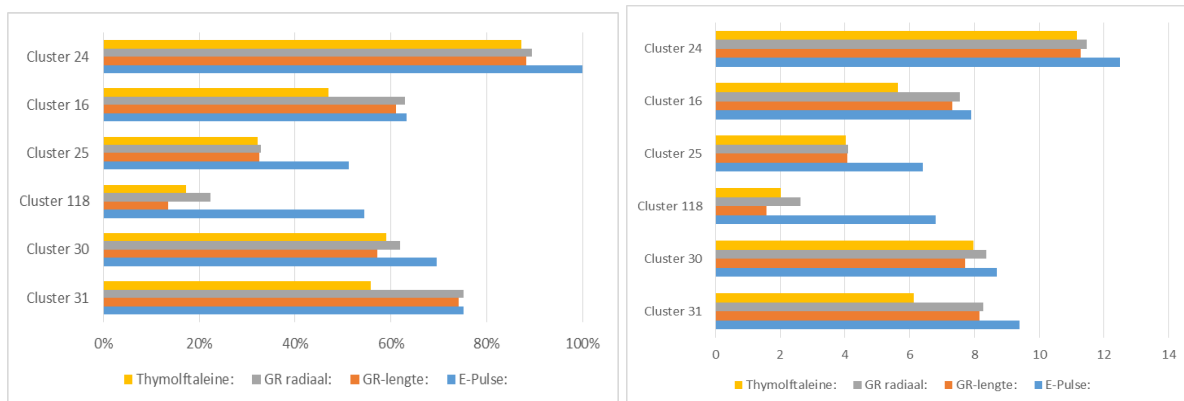
Opgemerkt wordt dat ePulse een gemiddelde effectieve wanddikte meet, waardoor het te verwachten is dat lokale minima minder goed worden gedetecteerd. Om die reden zou het logisch zijn om een bandbreedte op te stellen die uiting geeft aan de inhomogene uitloging.

Indien een vervangingsbeslissing zou plaatsvinden op basis van ranking van slechte naar goede toestand dan zou een vergelijking kunnen plaatsvinden op basis van de mate van uitloging. Deze zijn weergegeven in Figuur 28, links. Op basis van deze benadering zou per toestandsbepaling de ranking van slecht naar goed zijn:

• ePulse:	25	118	16	30	31
• Georadar – lengtemeting:	118	25	30	16	31
• Georadar – radiaalmeting:	118	25	30	16	31
• Thymolftaleïne:	118	25	16	31	30

De vervangingsbeslissing kan ook plaatsvinden op basis van ranking van de aanwezige wanddikte. Deze zijn weergegeven in Figuur 28, rechts. Voor ePulse is hierbij uitgegaan van een diameter van 12,5 mm aangezien bij deze techniek geen buizen worden uitgenomen en er uit moet worden gaan van de cataloguswaarde. Op basis van deze benadering zou per toestandsbepaling de ranking van slecht naar goed zijn:

• ePulse:	25	118	16	30	31
• Georadar – lengtemeting:	118	25	16	30	31
• Georadar – radiaalmeting:	118	25	16	31	30
• Thymolftaleïne:	118	25	16	31	30



Figuur 28 Links, maximum waarde resterende effectieve wanddikte per cluster in %. Rechts, Minimum waarden effectieve wanddikte per cluster in mm.

5.4 Toepassing van resultaten voor langetermijn prognosemodellen

Vitens past het PRP model toe om voorspellingen te maken van de veroudering van leidingen en ter ondersteuning van vervangingsbeslissingen. Voor AC-leidingen is het hierbij zinvol inzicht te hebben in de gemiddelde uitloging per jaar. Om dit voor de zes onderzochte leidingen in Apeldoorn vast te stellen worden de metingen met thymolftaleïne gebruikt aangezien deze als het meest betrouwbaar worden geacht. In Tabel 14 is voor alle leidingen de uitloging per jaar bepaald op basis van het jaar van aanleg en de per buis gemeten wanddikte bij aanleg en uitloging. De gemiddelde uitlogingssnelheid per leiding varieert van 0,036 tot 0,111 mm per jaar. De gemiddelde uitlogingssnelheid voor alle onderzochte buizen bedraagt 0,085 mm/jaar. Het blijkt dat de oudste leidingen uit 1962 een lagere gemiddelde uitlogingssnelheid hebben dan meer recente leidingen uit 1963, 1966 en 1971. Deze gemeten uitlogingssnelheden tonen aan dat er een grote variatie is in de mate van uitloging van AC-leidingen. Dat geldt ook voor deze leidingen in vergelijkbare liggingsomstandigheden. Op basis van deze metingen zou Vitens de gemiddelde uitloging vermeerderd met de standaarddeviatie kunnen hanteren als veilige benadering. Deze bedraagt 0,115 mm/jaar. Bij aanname van een normaalverdeling van de gemeten uitloging zou 86% van de waarden lager of gelijk moet zijn. Een betere en veiligere benadering betreft 0,146 mm/jaar, dat overeenkomt met het gemiddelde vermeerderd met twee keer de standaarddeviatie en die inhoudt dat 97,5% van de waarden lager of gelijk moet zijn.

Tabel 14 Gemeten uitloging per jaar met de thymolftaleïne-testen in mm/jaar

	Cluster 31	Cluster 30	Cluster 118	Cluster 25	Cluster 16	Cluster 24	Alle buizen
Jaar van aanleg	1962	1962	1963	1966	1971	1975	
Gemiddelde	0,045	0,062	0,098	0,111	0,077	0,036	0,085
Maximum	0,079	0,085	0,160	0,143	0,128	-	0,160
gem. + standaarddeviatie	0,065	0,072	0,123	0,127	0,107	-	0,115
gem. + 2* standaarddeviatie	0,084	0,082	0,149	0,144	0,136		0,146

6 Conclusies en aanbevelingen

Op basis van de analyses van de meetresultaten uitgevoerd door zes AC-leidingen in Apeldoorn met ePulse, Georadar en thymolftaleïne, zijn onderstaande conclusies getrokken.

1. De bij exitbeoordelingen verkregen AC-buizen zijn in een beschermde omgeving onderzocht met georadar en thymolftaleïne. De gemiddelde waarden van beide metingen komen in het algemeen vrij goed overeen. De maatgevende minimum wanddikte per leiding blijkt in sommige gevallen met georadar en in andere gevallen met thymolftaleïne te worden geïdentificeerd. De meest logische verklaring hiervoor is dat bij georadar de nauwkeurigheid om lokale en extreme uitloging te constateren beperkend is en dat bij thymolftaleïne de meetdichtheid om lokale en extreme uitloging te constateren beperkend is.
2. Op basis van de constatering in bovenstaande conclusie, en de benodigde inspanning voor het uitvoeren van georadarmetingen, lijkt er geen meerwaarde voor exitbeoordelingen met georadar boven thymolftaleïne.
3. De ePulse techniek is met oog op de nauwkeurigheid en de dichtheid van de meting onvoldoende betrouwbaar voor de identificatie van te vervangen leidingen en lijkt geen aantoonbaar voordeel te bieden op informatie verkregen uit storingsmeldingen of expertkennis.
4. Uitgaande van een restlevensduur van 30 jaar en een met Comsima berekende minimale wanddikte van 2,0 mm, geldt dat op het moment van meten (uitgevoerd in 2020) de minimum aanwezige effectieve wanddikte 5,1 mm moet bedragen. Hierbij wordt uitgegaan van een jaarlijks gelijke uitloging. Voor drie van de vijf leidingen die zijn vervangen, geldt dat waarden zijn gemeten die lager zijn dan deze grenswaarde. Deze leidingen zijn derhalve terecht vervangen.
5. De metingen tonen aan, zoals ook geconstateerd in eerder BTO (o.a. Beuken en van Laarhoven, 2019), dat de wanddikte van de AC-buizen een grote variatie kent. Uitgangspunt was een wanddikte van 12,5 mm. Metingen met een schuifmaat resulteerden in waarden tussen 10,4 en 16,5 mm. Beslissingsondersteunende softwarepakketten voor vervanging en inspectietechnieken, dienen rekening te houden van deze variatie.
6. De gemeten uitloging laat zien dat de effectieve wanddikte in de omtrekriching vrij constant is. De gemiddelde meetwaarde gemeten met georadar in de radiaalrichting zijn hoger dan de gemiddelde meetwaarde gemeten met georadar in de lengterichting, die weer hoger zijn dan de gemiddelde meetwaarde met thymolftaleïne. Dit bevestigt de overschatting van de effectieve wanddikte gemeten met georadar (zie ook van Laarhoven en van Summeren, 2019).
7. De vijf leidingen die Vitens heeft vervangen laten grote verschillen zien in de mate van uitloging, waarbij de twee oudste leidingen de langste levensduur hebben. Dat wil zeggen dat selectie op jaar van aanleg geen garantie is voor de meest kostenefficiënte vervangingsbeslissing. Het extrapoleren van de meetgegevens naar voorspellen van de restlevensduur van andere leidingen is beperkt betrouwbaar.
8. Alleen met thymolftaleïne is het onderscheid te maken tussen inwendige en uitwendige uitloging. Bij deze leidingen is de inwendige uitloging (gemiddeld 3,0 mm) aanzienlijk groter dan de uitwendige uitloging (gemiddeld 0,7 mm). Wat een aanwijzing is dat vooral de (historische) waterkwaliteit van invloed was op de uitloging.

9. Voor het simuleren van het verouderingsgedrag van AC-leidingen met een voorspelmodel voor langetermijninvesteringen, kan op basis van de hier beschreven metingen een gemiddelde maatgevende uitloging (zijnde de maximale uitloging per buis) worden aangehouden van 0,085 mm/jaar. Omdat er sprake is van een grote variatie van de uitloging kan er beter gekozen worden voor 0,115 mm/jaar of 0,146 mm/jaar, zijnde het gemiddelde vermeerderd met respectievelijk eenmaal en tweemaal de standaarddeviatie.

De volgende aanbevelingen worden gedaan.

1. Gezien de grote variatie in de uitloging van AC leidingen, is het lastig gegevens van exitbeoordelingen te extrapoleren naar andere leidingen. De vervanging van AC vergt echter grote investeringen. Om toch te komen tot enige onderbouwing van het vervangingsbeleid wordt Vitens aanbevolen het vervangingsbeleid van AC distributieleidingen te onderbouwen door thymolftaleïnemetingen uit te voeren bij reparaties of op beperkte schaal, wijkgericht en op gestructureerde wijze bij vervanging van leidingen.
2. Mede gezien de constatering dat de oudste leidingen de langste levensduur hebben, wordt Vitens wordt aanbevolen de vervangingen zo veel mogelijk te baseren op betrouwbare meettechnieken. Hiervoor kan op termijn een in-line inspectie met een robot dienen. Een mogelijk (tijdelijk) alternatief kan zijn het proactief uitnemen van delen van buizen. Dit kan geschieden door het maken van een klein gat boven op de leiding (bijvoorbeeld door in een trottoir of een groenstrook een klein gat te graven of te zuigen), met een aanboring en onder druk een schulp uit te nemen en die te beproeven met thymolftaleïne.
3. Vitens wordt aanbevolen na te gaan of de hier beschreven bepaling van de benodigde wanddikte met Comsima meerwaarde biedt voor de restlevensduurbepaling.
4. Met Comsima kan een minimum wanddikte worden bepaald op basis van het uitgangspunt van een gelijkmatige wanddikte. Omdat de effectieve wanddikte zeer inhomogeen is, wordt aan het BTO aanbevolen meer onderzoek uit te voeren naar de mechanische implicaties van enkelvoudige inhomogeniteiten (met oog op o.a. de vorm, de omvang en de aanwezige wanddikte) en de verspreiding/positionering van deze inhomogeniteiten.
5. Voor toekomstige wanddiktebepalingen wordt aanbevolen deze uit te voeren met een schuifmaat en niet met een omtrekmeting.

7 Literatuur

Agudelo-Vera en Blokker (2018): Vergelijken vervangingsstrategieën AC-leidingen, KWR Water Research Institute, Nieuwegein, BTO 2018.047.

Beuken Ralph, Peter Horst, George Mesman en Ronald van Eijk (2013): Akoestische metingen brengen de leidingconditie in beeld, H2O-Online / 19 december 2013.

Beuken R.H.S. (2016). Exitbeoordelingen AC leidingen bij WML, fase 2: Nadere analyse, KWR Water Research Institute, Nieuwegein, BTO 2016.094.

Beuken R.H.S. en K.A. van Laarhoven (2019). Sterkteonderzoek asbestcementbuizen, KWR Water Research Institute, Nieuwegein, BTO 2019.008.

Echologics (2017): Leak Detection and Condition Assessment - Vitens, Echologics Reference No.: 42216124.

Inspectie Leefomgeving en Transport (2020): Prestatievergelijking drinkwaterbedrijven 2019, Inspectie Leefomgeving en Transport, Den Haag

Kraaijvanger (2019): Vergelijkend onderzoek restwanddiktemeetmethodieken AC-cohorten, Rapportnummer: TC201815, Vitens.

Mesman, G.A.M. en J. van der Wielen (2005). Georadar: geschikt om conditie AC-leidingen te beoordelen? Een vergelijking met de fenolftaleïne-test, KIWA, Nieuwegein, KWR05.023.

Mesman, G.A.M., R.H.S. Beuken en M.A. Meerkerk (2016): Conditiebepaling voor drinkwater-leidingen, KWR Water Research Institute, Nieuwegein, PCD 6:2016.

Slaats, P.P.G. en G.A.M. Mesman (2004). Conditiebepaling AC waterleidingen, KIWA, Nieuwegein, BTO 2003.039.

van Laarhoven, K.A. en J.R.G van Summeren (2019). Röntgentomografie als meetmethode voor toestandsbepaling van asbestcementleidingen, KWR Water Research Institute, Nieuwegein, BTO 2019.010.

Vewin (2012): Drinkwaterstatistieken 2012, Vereniging van waterbedrijven in Nederland (Vewin), Den Haag.

Vewin (2017): Drinkwaterstatistieken 2017, Vereniging van waterbedrijven in Nederland (Vewin), Den Haag.

Wols, B.A. en A. Moerman (2017): Verouderingsmodule voor spanningsberekeningen in leidingen met Comsima, KWR Water Research Institute, Nieuwegein, BTO 2017.074.

I Metingen ePulse

De resultaten van de metingen die Echologics heeft uitgevoerd met ePulse metingen zijn weergegeven in onderstaande tabel. De metingen waar ook een conditiebepaling met georadar en thymolftaleïne hebben plaatsgevonden, zijn omkaderd.

Cohort	Segment	Meting	Street name	Install year	Length (m)	Internal diameter (mm)	Nominal thickness (mm)	ePulse measured thickness (mm)	% Change from nominal (%)	Loss rate (mm/yr)	Remaining life (Years)
1	1	5	Haringvliet	1962	111.8	100	12.5	9.4	-25%	0.06	50+
1	2	4	Rijnstraat	1962	102.3	100	12.5	8.7	-30%	0.07	40-49
1	3	12	Amstelstraat	1962	78.3	100	12.5	10.4	-17%	0.04	50+
1	4	3	Tjonger	1962	97.7	100	12.5	6.1	-51%	0.12	1-9
1	5	2	1e Wormenseweg	1964	83.5	100	12.5	8.8	-30%	0.07	40-49
2	6	17	Pieter Steinstraat	1966	76.9	100	12.5	8.8	-30%	0.07	40-49
1	7	10	De Savornin Lohmanstraat	1960	125.2	100	12.5	10.2	-18%	0.04	50+
2	8	16	Zwaansprengsweg	1965	110.1	100	12.5	7.7	-38%	0.09	20-29
4	9	37	Edelenveld	1975	87.5	100	12.5	8.3	-34%	0.10	20-29
4	10	40	Raadsherenveld	1975	59.0	100	12.5	12.5	0%	0.00	50+
4	11	47	Schepenveld	1975	73.8	100	12.5	12.3	-2%	0.00	50+
3	12	25	Poortersveld	1974	150.3	100	12.5	7.6	-39%	0.12	10-19
4	13	45	Elegastgaarde	1976	241.5	100	12.5	12.4	-1%	0.00	50+
4	14	39	Steenhouwersdonk	1975	82.5	100	12.5	12.3	-2%	0.00	50+
4	15	42	Klingmakersdonk	1975	73.5	100	12.5	8.7	-30%	0.09	30-39
4	16	38	Tingietersdonk	1975	108.3	100	12.5	11.1	-11%	0.03	50+
3	17	27	Faunastraat	1972	79.0	100	12.5	9.7	-22%	0.06	50+
2	18	15	Melisastraat	1969	80.6	100	12.5	9.7	-22%	0.06	50+
3	19	26	Morellenlaan	1971	85.7	100	12.5	7.9	-37%	0.10	20-29
1	20	1	Oud Veldzichtlaan	1964	76.8	100	12.5	8.2	-34%	0.08	20-29
3	21	30	Kruizemuntstraat	1970	79.1	100	12.5	8.8	-30%	0.08	30-39
3	22	29	Ratelaar	1971	69.4	100	12.5	8.1	-35%	0.10	20-29
3	23	28	Zilverschoon	1973	100.7	100	12.5	7.2	-42%	0.12	10-19
2	24	13	Origenesstraat	1967	144.9	100	12.5	8.0	-36%	0.09	20-29
2	25	14	Socratesstraat	1967	79.8	100	12.5	7.1	-43%	0.11	10-19
2	26	24	Aubadestraat	1968	85.2	100	12.5	9.4	-25%	0.06	50+
3	27	36	Fauststraat	1970	72.4	100	12.5	7.0	-44%	0.12	10-19
1	28	11	Robbert Kochstraat	1960	98.2	100	12.5	9.3	-26%	0.06	50+
1	29	7	Pasteurstraat	1960	92.8	100	12.5	10.0	-20%	0.04	50+
1	30	6	Wendenlaan	1963	63.6	100	12.5	6.8	-46%	0.11	10-19
4	31	41	Tuinmanslaan	1974	87.7	100	12.5	6.9	-45%	0.13	1-9
1	32	9	Bosweg	1960	97.4	100	12.5	9.9	-21%	0.05	50+
3	33	31	Zandloperweg	1973	98.9	100	12.5	8.7	-30%	0.09	30-39
4	34	44	Magnolialaan	1976	108.4	100	12.5	10.9	-13%	0.04	50+
3	35	35	Jachtlaan	1973	104.7	100	12.5	9.1	-27%	0.08	40-49
2	36	19	Daalakkerweg	1968	102.1	100	12.5	9.5	-24%	0.06	50+
2	37	22	Kruisakkerweg	1968	113.5	100	12.5	8.8	-30%	0.08	40-49
2	38	20	Driehuizerweg	1969	172.3	100	12.5	7.4	-41%	0.11	10-19
2	39	21	Ritbroekstraat	1966	78.3	100	12.5	7.4	-41%	0.10	10-19
1	40	8	Blekersweg	1964	59.2	100	12.5	7.0	-44%	0.11	10-19
4	41	43	Oranjestraat	1974	100.7	100	12.5	8.3	-34%	0.10	20-29
2	42	18	Duivenlaan	1966	87.0	100	12.5	6.4	-49%	0.12	1-9
4	43	46	Zichtweg	1975	88.9	100	12.5	10.1	-19%	0.06	50+
2	44	23	Pieter Saenredamstraat	1967	107.0	100	12.5	8.2	-34%	0.09	30-39
3	45	34	Onstein	1972	83.3	100	12.5	9.4	-25%	0.07	50+
3	46	32	Boogaardslaan	1971	109.3	100	12.5	10.0	-20%	0.06	50+
4	47	48	Karhulstraat	1975	91.0	100	12.5	8.7	-30%	0.09	30-39
3	48	33	Puttenstein	1970	76.2	100	12.5	9.4	-25%	0.07	50+

II Protocol uitnemen en beproeven buizen

Door Vitens is een protocol opgesteld voor het uitnemen, transporteren en beproeven van de buizen. Relevante onderdelen van dit protocol voor voorliggend onderzoek zijn hieronder weergegeven.

- 1 Nadat het uitgenomen leidingdeel over de gehele lengte volledig is ontgraven, is op opeenvolgende buizen aan de bovenzijde een label aangebracht met de volgende kenmerken: leidingsegmentnummer, pijl met richting en clusternummer.
- 2 De gelabelde buizen zijn afzonderlijk gefotografeerd en er is een formulier ingevuld over de omgevingsituatie.
- 3 Nadat de buis is gelabeld en gefotografeerd, zijn deze uitgenomen en verpakt in plastic zakken
- 4 De verpakte buizen zijn in een container geplaatst en dusdanig ondersteund dat beschadiging is voorkomen.
- 5 De toestandsbepaling is uitgevoerd op een centrale en speciaal ingerichte locatie die voldoet aan alle arbo-vereisten voor het verwerken van asbest.
- 6 De wanddikte van de buis en de omtrek is aan de buitenzijde gemeten.
- 7 Er is een toestandsbepaling uitgevoerd met georadar, waarbij de scanner over de buitenzijde van de buiswand wordt bewogen. Van elke buis zijn de volgende georadarmetingen uitgevoerd:
 - 4 metingen in lengterichting (op de klokstanden 12, 3, 6 en 9 uur, waarbij 12 uur overeenkomt met de aangebrachte pijl op de bovenzijde van de buis, zie punt 1);
 - 1 radiaalmeting.
- 8 Er is een toestandsbepaling uitgevoerd met thymolftaleïne, waarbij met een knipper een vers breukvlak in radiale richting is gecreëerd. De locatie van dit breukvlak komt overeen met de radiaalmeting. Op het breukvlak is thymolftaleïne aangebracht. Er is een foto gemaakt van het breukvlak met thymolftaleïne en op vier locaties op de omtrek is de inwendige en uitwendige uitloging gemeten met een schuifmaat. De merktekens maken het mogelijk de posities van georadarmetingen en thymolftaleïnemetingen onderling af te stemmen.
- 9 Na beproeving zijn de buizen naar AC-container gebracht en afgevoerd.



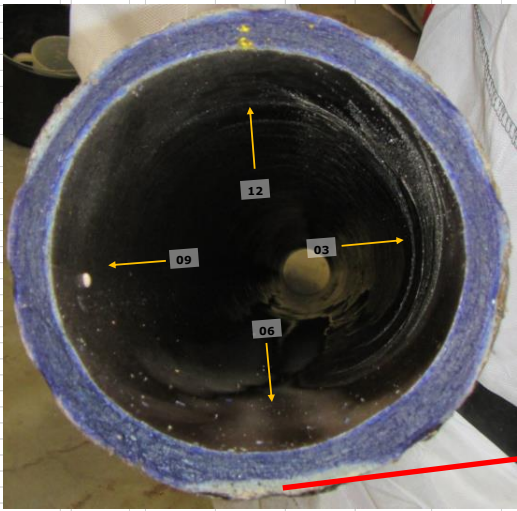
Figuur 29 Uitvoering van de meting: rechtsboven de referentie van de onderzochte buis; links de meting met georadar, waarbij de pijl de in de sleuf aangebrachte bovenzijde weergeeft en de dunne gele lijnen de posities van de georadarmetingen; rechtsonder het resultaat van een thymolftaleïnetest, waarbij de grijze kleur het uitgeloopte deel van de buiswand weergeeft.

III Thymolftaleinetesten – controle outliers

Door Oomen zijn foto's gemaakt van alle breukvlakken waarop een thymolftaleinetest is uitgevoerd. Omdat de minimale waarden maatgevend zijn voor de toestand van de leiding, zijn deze in deze bijlage geëvalueerd.

Cluster 31-1: 56%

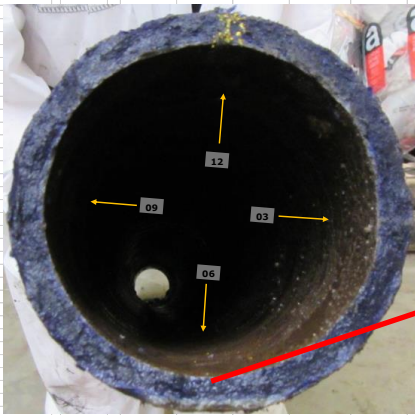
THYMOLFTALEINETEST						
monster	: CL31BD5					
datum	: 23 februari 2017					
diameter	: 100 mm					
project	: 16R035					
testlocatie	: Duiven					
klokstand	uitloging binnenzijde	uitloging buitenzijde	wanddikte	wanddikte constructief	relatief	
12	: 0,72	: 0,36	10,87	9,79	90,1%	
03	: 0,70	: 1,15	11,52	9,67	83,9%	
06	: 0,62	: 5,54	13,93	7,77	55,8%	
09	: 0,73	: 0,00	10,39	9,66	93,0%	
buisdeel	: 0,73	: 5,54	10,39	7,77	55,8%	



Lijkt correct

Cluster 31-3: 65%

THYMOLFTALEINETEST						
monster	: CL31BD15					
datum	: 23 februari 2017					
diameter	: 100 mm					
project	: 16R035					
testlocatie	: Duiven					
klokstand	uitloging binnenzijde	uitloging buitenzijde	wanddikte	wanddikte constructief	relatief	
12	: 1,30	: 0,00	11,20	9,90	88,4%	
03	: 0,98	: 0,00	11,20	10,22	91,3%	
06	: 1,03	: 2,75	10,88	7,10	65,3%	
09	: 1,10	: 0,00	11,27	10,17	90,3%	
buisdeel	: 1,30	: 2,75	10,88	7,10	65,3%	



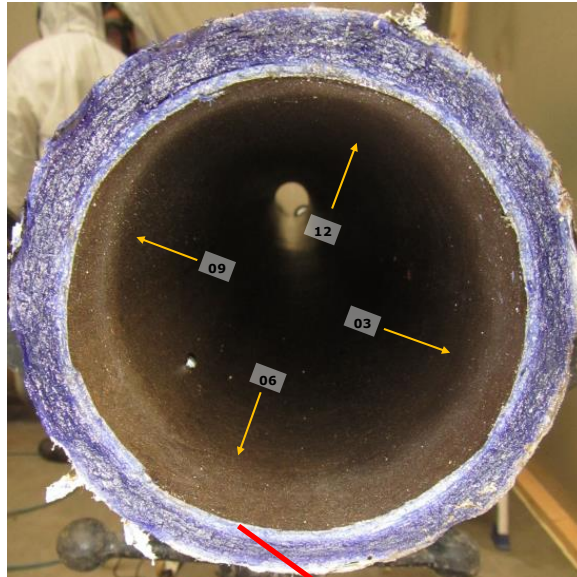
Lijkt correct

Cluster 30 -1: 62%

THYMOLFTALEÏNETEST

monster : CL30BD7
 datum : 3 oktober 2017
 diameter : 100 mm
 project : 16R035
 testlocatie : Duiven

Klokstand	uitloging		wanddikte	wanddikte	
	binnenzijde	buitenzijde		constructief	relatief
12	2,48	0,00	12,67	10,19	80,4%
03	1,71	0,00	12,71	11,00	86,5%
06	4,84	0,00	12,65	7,81	61,7%
09	4,52	0,00	12,67	8,15	64,3%
buisdeel	4,84	0,00	12,65	7,81	61,7%



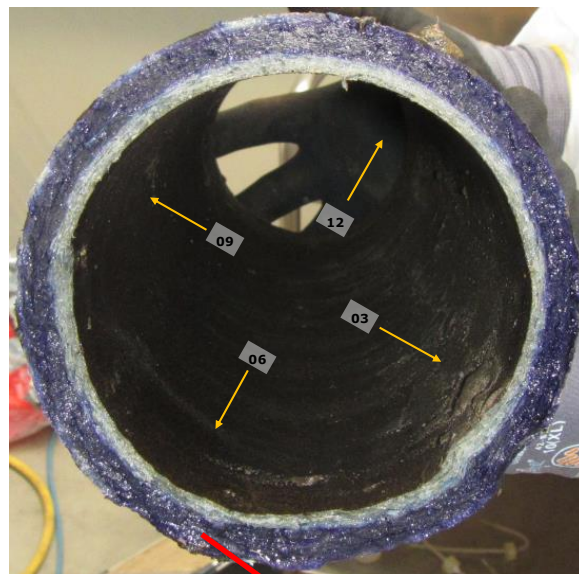
Is dit 5 mm, of 38%?

Cluster 30 - 3: 59%

THYMOLFTALEÏNETEST

monster : CL30BD16
 datum : 2 oktober 2017
 diameter : 100 mm
 project : 16R035
 testlocatie : Duiven

Klokstand	uitloging		wanddikte	wanddikte	
	binnenzijde	buitenzijde		constructief	relatief
12	3,63	0,00	12,05	8,42	69,9%
03	3,86	0,00	11,98	8,12	67,8%
06	4,98	0,00	12,14	7,16	59,0%
09	3,64	0,00	12,03	8,39	69,7%
buisdeel	4,98	0,00	11,98	7,16	59,0%



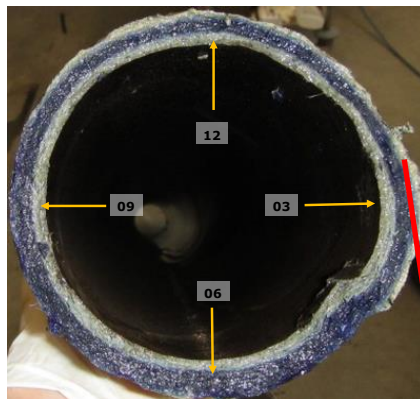
Is dit 5 mm, of 40%?

Cluster 118 - 1: 17%

THYMOLFTALEÏNETEST

monster : CL118BD11B
 datum : 13 november 2017
 diameter : 100 mm
 project : 16R035
 testlocatie : Duiven

klokstand	uitloging		wanddikte	wanddikte constructief	relatief
	binnenzijde	buitenzijde			
12	4,32	2,54	11,18	4,32	38,6%
03	4,93	4,34	11,20	1,93	17,2%
06	5,27	1,31	11,04	4,46	40,4%
09	5,72	0,00	11,89	6,17	51,9%
<i>buisdeel</i>	<i>5,72</i>	<i>4,34</i>	<i>11,04</i>	<i>1,93</i>	<i>17,2%</i>



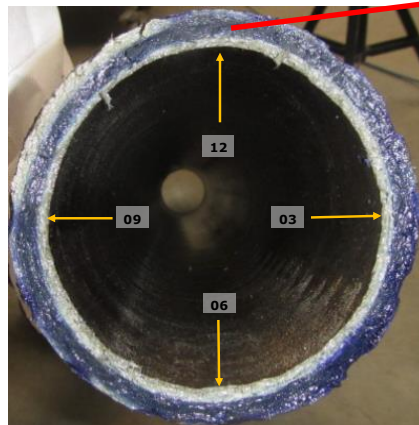
Effectieve wanddikte lijkt meer dan 17%

Cluster 118 - 4: 31%

THYMOLFTALEÏNETEST

monster : CL118BD24A
 datum : 13 november 2017
 diameter : 100 mm
 project : 16R035
 testlocatie : Duiven

klokstand	uitloging		wanddikte	wanddikte constructief	relatief
	binnenzijde	buitenzijde			
12	3,05	4,94	11,59	3,60	31,1%
03	4,15	0,00	11,49	7,34	63,9%
06	4,93	0,00	11,59	6,66	57,5%
09	4,91	0,00	11,73	6,82	58,1%
<i>buisdeel</i>	<i>4,93</i>	<i>4,94</i>	<i>11,49</i>	<i>3,60</i>	<i>31,1%</i>



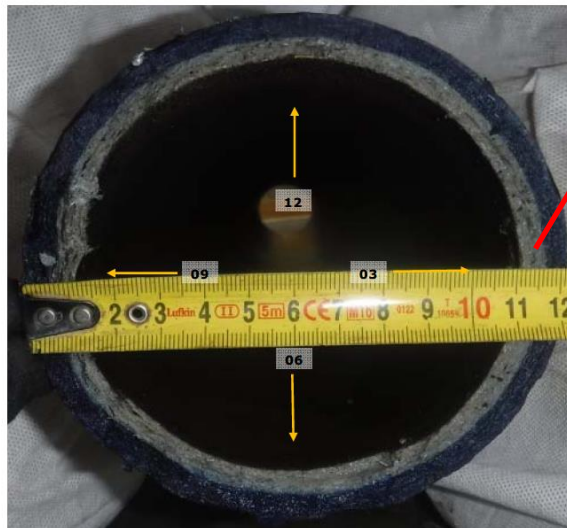
Lijkt correct, maar moeilijk te zien

CL25BD5: 32%

THYMOLFTALEÏNETEST

monster : CL25BD5
 datum : 16 juli 2018
 diameter : 100 mm
 project : 16R035
 testlocatie : Duiven

klokstand	uitloging		wanddikte	wanddikte constructief	relatief
	binnenzijde	buitenzijde			
12	5,91	0,00	11,36	5,45	48,0%
03	7,61	0,00	11,22	3,61	32,2%
06	5,58	0,00	11,09	5,51	49,7%
09	5,65	0,00	11,25	5,60	49,8%
buisdeel	7,61	0,00	11,09	3,61	32,2%



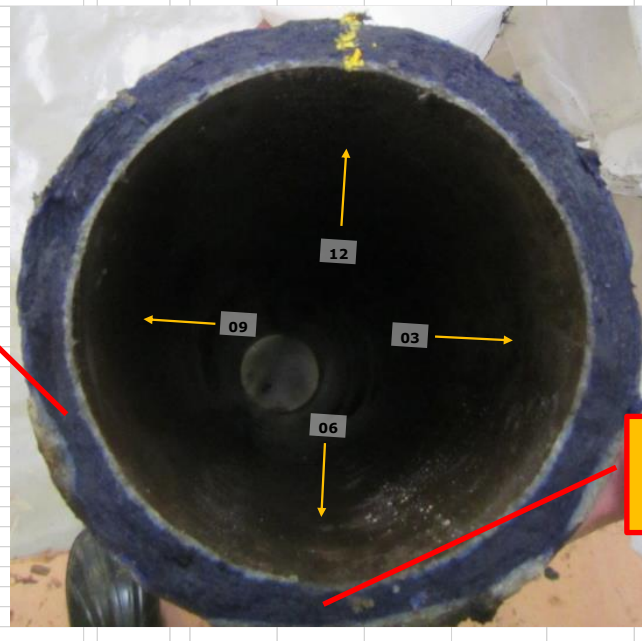
Lijkt eerder 50% effect. wanddikte dan 32%

Cluster 16 -: 47%

THYMOLFTALEÏNETEST

monster : CL16BD22A
 datum : 20 februari 2017
 diameter : 100 mm
 project : 16R035
 testlocatie : Duiven

klokstand	uitloging		wanddikte	wanddikte constructief	relatief
	binnenzijde	buitenzijde			
12	2,65	0,00	11,86	9,21	77,7%
03	2,21	0,00	12,15	9,94	81,8%
06	2,17	4,58	12,74	5,99	47,0%
09	2,01	0,00	12,15	10,14	83,5%
buisdeel	2,65	4,58	11,86	5,99	47,0%



Kleinste effectieve wanddikte?

Moelijk te controleren