

BTO 2019.008 | Februari 2019

BTO rapport

Sterkteonderzoek
asbestcementbuizen

BTO

Sterkteonderzoek asbestcementbuizen

BTO 2019.008 | Februari 2019

Opdrachtnummer

400554-192

Projectmanager

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

Opdrachtgever

BTO Thematisch onderzoek Assetmanagement

Kwaliteitsborger(s)

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

Auteur(s)

ir. R.H.S. (Ralph) Beuken, dr.ir. K.A. (Karel) van Laarhoven

Verzonden aan

BTO Thema Distributie

Jaar van publicatie
2019

Meer informatie

ir. R.H.S. (Ralph) Beuken
T 030-6069758
E ralph.beuken@kwrwater.nl

Keywords

Materiaalonderzoek,
leidingnetbeheer, conditiebepaling,
asbestcement

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



Watercycle
Research
Institute

BTO | Februari 2019 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

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

BTO Managementsamenvatting

Sterkteproeven verbeteren inzicht in sterkte-eigenschappen van gedegradeerde asbestcementbuizen

Auteur(s) ir. R.H.S. (Ralph) Beuken, dr.ir. K.A. (Karel) van Laarhoven

Om de conditie van asbestcementleidingen (AC) te kunnen voorspellen, is kennis van de veroudering van asbestcement en van de invloed van deze veroudering op de sterkte van het materiaal cruciaal. In dit onderzoek zijn de sterkte-eigenschappen van in het veld verouderde buizen mechanisch beproefd. Daarbij werden waarden voor stijfheid en bezwijkspanning gevonden die substantieel lager liggen dan de cataloguswaarden die tot nu werden gebruikt. Met deze realistischere sterkte-eigenschappen zullen betrouwbaardere voorspellingen kunnen worden gedaan bij het prioriteren van de vernieuwing van AC leidingen.



Asbestcementbuizen uit het veld werden onder gecontroleerde omstandigheden tot bezwijken gebracht om inzicht te krijgen in hun resterende sterkte na jarenlang gebruik

Belang: vernieuwing AC prioriteren

Nog ruwweg 25% van het drinkwatertransport- en distributienet bestaat uit asbestcement (AC). Drinkwaterbedrijven willen AC leidingen de komende decennia vervangen. Om te bepalen welke leidingen als eerste vervangen moeten worden, is kennis van de degradatie van deze leidingen en van de invloed van deze degradatie op de sterkte van de leidingen cruciaal.

Aanpak: 30 buisdelen getest met georadar, thymolftaleïne en mechanische beproeving

Voor dit onderzoek werden 30 asbestcementbuisdelen uitgenomen. De degradatie werd vastgesteld met de gangbare technieken: georadar en thymolftaleïne. Vervolgens werden de sterkte-eigenschappen (stijfheid en bezwijkspanning) van de buizen mechanisch beproefd in het microlab van de faculteit civiele techniek aan de universiteit van Delft.

Resultaten: stijfheid en bezwijkspanning beduidend lager dan cataloguswaarden

Er werden waarden voor stijfheid en bezwijkspanning gevonden die substantieel lager liggen dan de cataloguswaarden die tot nu toe werden gebruikt. Dit suggereert dat de buizen minder sterk zijn dan gedacht en dat de huidige sterkteberekeningen aangescherpt zouden moeten worden.

Implementatie: meer realistische sterkte-eigenschappen voor conditiemodellen

De uitkomsten voorzien de huidige conditiemodellen voor AC-buizen van realistischere sterkte-eigenschappen, zodat hiermee betere voorspellingen kunnen worden gedaan.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Sterkteonderzoek asbestcementbuizen* (BTO-2019.008).

Inhoud

Inhoud	1
1 Inleiding	2
1.1 Aanleiding onderzoek	2
1.2 Doel	3
1.3 Aanpak onderzoek en opbouw van dit rapport	3
2 Beschrijving uitvoering onderzoek	4
2.1 Verzamelen proefstukken	4
2.2 Preparatie proefstukken	4
2.3 Opzet bezwijkproeven	4
2.4 Bepalen bezwijkspanning en tangentiële elasticiteitsmodulus	6
2.5 Microscopie	7
3 Resultaten	8
3.1 Geometrie	8
3.2 Sterkte-eigenschappen op basis van nominale wanddikte	9
3.3 Sterkte-eigenschappen op basis van restwanddikte	9
4 Chemische degradatie van asbestcementbuizen	11
4.1 Motivatie en aanpak	11
4.2 Chemische samenstelling en microstructuur van cement	11
4.3 Uitloging en de thymolftaleïne test	13
4.4 Uitwisselingsreacties	14
4.5 Onderzoek naar degradatie van asbestcementbuizen	17
5 Discussie	19
5.1 Met oog op de uitvoering van de proeven	19
5.2 Met oog op de resultaten van de proeven	19
5.3 Met oog op het degradatiemechanismen	21
6 Conclusies en aanbevelingen	22
6.1 Conclusies van dit onderzoek	22
6.2 Aanbevelingen	22
7 Referenties	24
Bijlage I Overzicht aangeleverde buisdelen	26
Bijlage II Rapportage TU-Delft	27

1 Inleiding

1.1 Aanleiding onderzoek

Het Nederlandse leidingnet bestaat voor ongeveer 30.000 km aan asbestcement (AC) leidingen. Deze leidingen zijn grotendeels aangelegd in de periode 1950-1980 en drinkwaterbedrijven beschouwen dat een aanzienlijk deel van deze leidingen de komende decennia het einde van de levensduur zal bereiken. Om te bepalen welke leidingen als eerste vervangen moeten worden, is kennis nodig over actuele toestand en de restlevensduur van deze leidingen. Hiervoor is het van belang kennis te hebben van het dominante degradatiemechanisme van AC buizen. 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. De veronderstelling is dat de sterkte van het uitgeloopte deel verwaarloosbaar is ten opzichte van die van het niet-uitgeloopte deel. Met behulp van inspectietechnieken zoals de thymolftaleïne, e-Pulse of georadar, is het mogelijk om de dikten van het uitgeloopte en niet-uitgeloopte deel van de buiswand te bepalen. Een beschrijving van deze methoden is opgenomen in Mesman et al. (2016). De dikte van het niet-uitgeloopte deel wordt de effectieve wanddikte genoemd.

Een belangrijke vraag na het vaststellen van de effectieve wanddikte is of deze voldoende sterkte bezit. Hiervoor is het nodig het spanningsverloop te kennen in meer of minder uitgeloopte buizen en de bezwijkspanning, bij voorkeur in tangentiële en longitudinale richting. Deze waarden zijn gegeven in oude catalogi van AC-producenten [zie bijvoorbeeld Eternit, 1980?]. Sterktewaarden uit oude catalogi zijn minimumeisen ten behoeve van het productieproces. Het is niet duidelijk hoe de werkelijke sterkewaarden zich verhouden tot de minimumeisen van productie en of deze waarden in de loop van de tijd zijn veranderd. Ook is het onzeker hoe representatief de minimale sterkewaarden in dergelijke catalogi zijn voor alle aangelegde buizen. Verder geldt dat voor de metingen met e-Pulse dat de gemiddelde wanddikte over het meettraject is afgeleid van geluidspatronen, waarbij voor het berekenen van de gemiddelde wanddikte gebruik wordt gemaakt van de Young's modulus [Beuken et al., 2015]. Een en ander betekent dat het voor het bepalen van de restlevensduur van leidingen van belang is actuele kennis te hebben van materiaaleigenschappen van AC-buizen, te weten de bezwijkspanning en de Young's Modulus.

Opgemerkt moet worden dat de vertaling van meetwaarden afkomstig van de genoemde inspectietechnieken naar een representatieve uitspraak naar een leiding niet eenvoudig is te maken. Aangevoerd is dat de spreiding van meetresultaten met thymolftaleïne groot is en dat er op basis van een beperkt aantal metingen geen uitspraak is te doen over de gehele leiding [Beuken, 2016]. Deze conclusie zet ook vraagtekens bij de metingen met e-Pulse aangezien die resulteert in een gemiddelde effectieve wanddikte en daarmee geen rekening houdt met extreme waarden die maatgevend zijn voor het optreden van breuken.

Een andere methode om de restlevensduur te bepalen van AC-leidingen is door het gebruik van rekenkundige modellen. KWR heeft het softwarepakket Comsima ontwikkeld om spanningen in de buiswand te berekenen. Hierbij wordt een verhoogde kans op leidingbreuk voorspeld als de berekende spanning hoger is dan de bezwijkspanning [zie o.a. Wols en Moerman, 2017]. Ook voor deze berekeningen is kennis nodig van actuele waarden van de bezwijkspanning en de Young's Modulus.

In een eerder uitgevoerd BTO (Kennisregels veroudering leidingmateriaal) zijn door het Belgische laboratorium Becetel sterkteproeven uitgevoerd op AC buisdelen. Dit betrof proeven waarbij de buis op twee tegenovergestelde locaties in elkaar wordt gedrukt, de zogenaamde schedeldrukproef. Omdat er geen zicht was op de uitloging ter plaatse van de locatie waar de maximale spanning optreedt, zijn de resultaten van deze proeven lastig met elkaar te vergelijken. Tevens is er bij de uitvoering van de proeven door Becetel een groot aantal onduidelijkheden opgetreden, waardoor de interpretatie van de metingen niet mogelijk was. De resultaten van deze proeven zijn derhalve niet gepubliceerd.

In de praktijk komt het voor dat de thymolftaleïnetest een hoge pH aangeeft (en er dus nog calciumhydroxide in de buiswand aanwezig lijkt), maar dat de buis toch onvoldoende sterkte bezit. Met name bij Brabant Water wordt dit verschijnsel aangetroffen en men spreekt dan van 'peperkoekbuizen'. Dit suggereert het optreden van een tweede degradatieproces. Eén mogelijke proces is het optreden van (chemische) uitwisselingsreacties tussen stoffen in de bodem met de componenten van het AC, die sterkteverlies tot gevolg kunnen hebben. Om een zo volledig mogelijk beeld van de degradatieprocessen in AC te hebben, verdient chemische degradatie van AC leidingdelen derhalve nader onderzoek.

1.2 Doel

Het hoofddoel van dit project is kennis te verkrijgen over de bezwijkspanning en de Young's Modulus van AC buisdelen. Een tweede doel van dit project is het uitvoeren van een literatuuronderzoek naar degradatiefenomenen voor asbestcement.

1.3 Aanpak onderzoek en opbouw van dit rapport

Een eerste stap in dit onderzoek bestaat uit het verkrijgen van dertig AC-buisdelen waarop fenolftaleïnetesten en georadarmetingen zijn uitgevoerd en waarvan de gegevens nauwkeurig zijn vastgelegd.

De sterkteproeven die in het kader van dit project plaatsvinden zijn uitgevoerd door de TU-Delft (Faculteit Civil Engineering and Geosciences, Sectie Materials & Environment) voor het verwerken en afvoeren van asbestbuizen is asbestsaneerder AM&P gecontracteerd. Hiervoor heeft aanvullend op dit BTO-project financiering door de drinkwaterbedrijven plaatsgevonden. Dit heeft geresulteerd in twee aanvullende financieringen door de drinkwaterbedrijven op dit BTO. De uitvoering van dit onderzoek is door diverse omstandigheden vertraagd en maak nog deel uit van het BTO programma 2013-2017.

In hoofdstuk 2 is beschreven op welke wijze de proefstukken zijn verkregen, hoe de bezwijkproef is uitgevoerd en hoe de bepaalde bezwijkdruk is om te zetten naar een bezwijkspanning en de tangentele elasticiteitsmodulus. In hoofdstuk 3 zijn de resultaten van de bezwijkproef beschreven. In hoofdstuk 4 wordt een beschrijving gegeven van chemische degradatie van asbestcementbuizen. In hoofdstuk 5 worden de resultaten besproken en in het kader geplaatst van restlevensduurbepaling. Conclusies en aanbevelingen zijn beschreven in hoofdstuk 6.

2 Beschrijving uitvoering onderzoek

2.1 Verzamelen proefstukken

In het contract met de TU-Delft is overeengekomen om dertig sterkteproeven uit te voeren op proefstukken die door drinkwaterbedrijven zijn aangeleverd. Voor het uitnemen en aanleveren van de proefstukken (buisdelen) is gevraagd om:

- een buislengte van 0,8 tot 1,1 meter;
- een nominale diameter van 100 mm;
- een recht buisdeel waarvan de uiteinden zijn losgeknipt;
- een markering van de bovenkant van de buis over de hele lengte;
- de buisdeel te voorzien van een codering en data over ligging en leeftijd;
- het uitvoeren van een toestandsbepaling.

Tevens is aan de bedrijven gevraagd om proefstukken aan te leveren van verschillende leeftijden en kwaliteiten.

In totaal zijn 32 buisdelen aangeleverd, waarbij sterkteproeven zijn uitgevoerd op 28 buisdelen. In Bijlage I is een overzicht gegeven van de aangeleverde buizen.

2.2 Preparatie proefstukken

Alle buizen zijn met behulp van röntgentomografie (CT) geïnspecteerd voor aanvang van de barstdrukproeven. Hiervoor werd een medische scanner van het type Siemens SOMATOM Definition gebruikt, met een bundel van 100 kVp en een resolutie van 0,3 mm per pixel en 1.5 mm per slice.

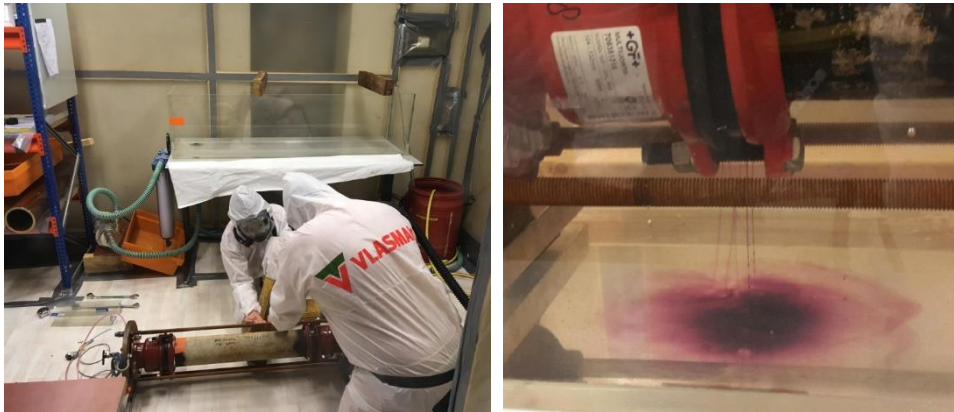
Met CT-beelden kan een gedetailleerd beeld van de buizen verkregen worden terwijl deze ingepakt waren, zodat geen verdere maatregelen in verband met asbest nodig waren. Op basis van de CT-scan is geconcludeerd dat een aantal buizen in de huidige vorm niet beproefd kon worden vanwege de aanwezigheid van breuken of in één geval de aanwezigheid van een uitsparing ter plaatse van een aanboring (zie ook In Bijlage I). Ook bleek dat de uiteinden van een aantal buisdelen door het knippen dusdanig onregelmatig waren dat hierop geen multi-joint bevestigd kon worden. Vóór beproeving zijn deze buizen op maat gezaagd. Deze buizen werden gezaagd en niet geknipt om de proefstukken minimaal te belasten en zo beïnvloeding van de barstdrukproef te voorkomen.

De CT-beelden geven een gedetailleerd beeld van materiaalverschillen in de buiswand en daarmee de overgangen van uitgeloozd naar niet-uitgeloozd AC. Om dit beeld voor analyse te benutten zijn beeldverwerkingsanalyses nodig die buiten de strekking van dit onderzoek vielen. Analyse voor het verder benutten van deze beelden vindt plaats in het onderzoek gerapporteerd in van Laarhoven en van Summeren (2019).

2.3 Opzet bezwijkproeven

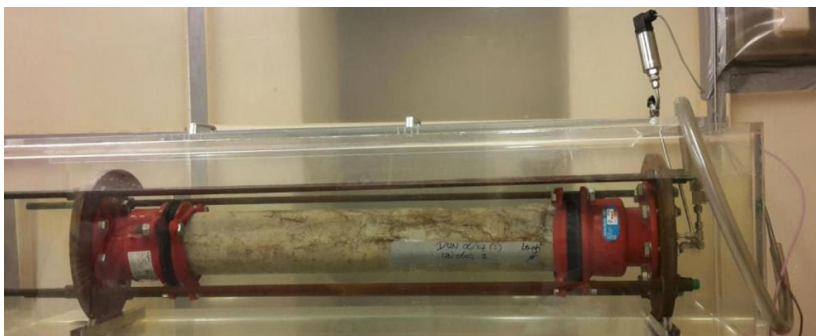
Vanwege de gevaren van het werken met asbest zijn door de TU-Delft een groot aantal veiligheidsmaatregelen getroffen. Voor aanvang van het project is door de TU-Delft asbestverwerker AM&P gecontracteerd voor het inrichten van de werkplek, het voorbereiden van de metingen, het uitvoeren van de reiniging en het verwerken van de proefstukken. De meetopstelling is uitgevoerd in een geïsoleerde ruimte waarin een onderdruk is gehanteerd. Laboranten dienen te werken met adembescherming. Toegang tot de ruimte geschiedde

door een dubbele sluis. Bij het verlaten van de geïsoleerde ruimte diende de medewerkers zich te douchen en zich te ontdoen van de veiligheidskleding. De tijd dat men in de geïsoleerde ruimte aanwezig mocht zijn is beperkt tot twee uur per dag. Ook werd aangegeven dat er altijd twee personen in de ruimte aanwezig moesten zijn. Vanwege deze gestelde veiligheidseisen is door de TU-Delft asbestsaneerder Vlasman ingehuurd voor assistentie bij de uitvoering van de proeven. Zie Figuur 1(links) voor een impressie van de geïsoleerde ruimte.



FIGUUR 1. LINKS: IMPRESSIE VAN DE BEPROEVINGSRUIMTE. RECHTS: LEKKAGE AAN DE MULTI-JOINTS TIJDENS TESTEN, ZICHTBAAR GEMAAKT DOOR TIJDENS DE PROEVEN GEKLEURD WATER TE GEBRUIKEN.

De sterkte van de buisdelen is beproefd middels een bastdrukproef, waarbij spanning op de buiswand is aangebracht door afpersen met water. Om te voorkomen dat tijdens bezwijken asbestvezels in de lucht terecht zouden komen, is het buisdeel in een waterbassin geplaatst, zie Figuur 2. Het buisdeel is aan beide uiteinden voorzien van een multi-joint (specificaties Georg Fischer 3050+ 100mm EPDM afdichtingsring, PN16), waarbij één van de multi-joints is aangesloten op de pomp. Om uitschuiving te voorkomen zijn beide multi-joints verbonden met trekstangen. Het afpersen is uitgevoerd met een verdringerpomp die een constant volume pompt van 25 mL/minuut. Hiermee is het mogelijk de volumetoename tijdens de test te meten tussen de start van de proef en het moment van bezwijken. Gedurende het afpersen wordt de interne waterdruk gemeten. De drukken (niet te verwarren met wandspanningen) waarbij buizen beginnen te bezwijken in deze proef zijn zo hoog (2.4 tot 5 MPA, zie ook bijlage II) dat in sommige gevallen lekkage optrad ter plaatse van de joint voordat de buis was bezweken. Dit kon visueel worden vastgesteld doordat paarse kleurstof aan het water was toegevoegd (Figuur 1, rechts). In dat geval werd het volume verhoogd tot 100 mL/minuut met als doel een extra spanning in de buiswand te creëren. Dit vond bijvoorbeeld plaats bij meting 7 van buisdeel DUN04 (zie Bijlage II).



FIGUUR 2 AC BUISDEEL TIJDENS BEPROEVING

2.4 Bepalen bezwijkspanning en tangentiële elasticiteitsmodulus

De ruwe data van de barstdrukproeven zijn te gebruiken om de bezwijkspanning en elasticiteitsmodulus van het asbestcement te benaderen. De ruwe data zijn:

- De druk, P , in het systeem als functie van de tijd, t ;
- De volumestroom, Q , waarmee water wordt toegevoegd aan het systeem;
- De initiële wanddikte, d_0 , de initiële diameter, D_0 , en de lengte, L , van de buis, bepaald in het lab van Delft voorafgaand aan het experiment.

Op basis van de volumestroom kan het met de tijd toenemende volume van de buis worden bepaald. Hieruit kan vervolgens de toename in diameter en daarmee een toename in omtrek worden bepaald. Zo wordt de relatieve rek (de strain, ε) in de buis per tijdstap verkregen (zie Figuur 3-a). Dit gaat volgens de volgende formules:

$$D(t) = 2 \left(\frac{Q \cdot t}{L \cdot \pi} \right)^{0.5} \quad (1)$$

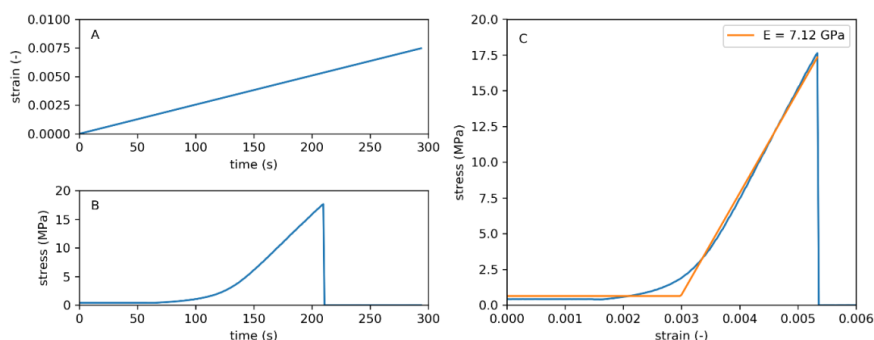
$$\varepsilon(t) = \frac{D(t)}{D_0} \quad (2)$$

Hierbij wordt aangenomen dat het volume van de buis homogeen toeneemt in radiale richting. De door de TU-Delft toegepaste verbindingsslangen en toebehoren zijn van een dergelijke kwaliteit dat de uitzetting hiervan als gevolg van de druktoename verwaarloosbaar is. Omdat er vanuit wordt gegaan dat al het ingaande water wordt omgezet in een volumetoename van het buisdeel, is deze benadering alleen van toepassing op metingen waarbij geen lekkage optreedt aan de multi-joints. De druk in het systeem als functie van de tijd kan vertaald worden naar de trekspanning (σ) in het AC als functie van de tijd (zie Figuur 3-b) met behulp van de ketelformule, waarbij ook rekening gehouden wordt met de in de tijd toenemende diameter:

$$\sigma(t) = \frac{P(t) \cdot D(t)}{2 \cdot d_0} \quad (3)$$

Aangezien er geen manier is om tijdens de proeven de wanddikte te meten, worden eventuele veranderingen in de wanddikte vanwege dwarscontractie verwaarloosd.

De maximale spanning die heerst vlak voor het breken van de buis is de bezwijkspanning. Om recht te doen aan het effect van degradatie van de wand door uitloging, kan in vergelijking (3) de effectieve wanddikte d_e worden gehanteerd in plaats van d_0 , te weten die wanddikte die niet is uitgelooft en dus nog sterkte bezit. Deze wanddikte is bepaald door de toestandsbepalingen met georadar of thymolftaleïne. Deze zou meer gedetailleerd te bepalen zijn uit de CT-metingen met behulp van kwantitatieve beeldanalyse.



FIGUUR 3. BEREKENDE REK- EN SPANNINGSDATA VAN BUIS 168218 ($L=1040$ mm, $D_0=100$ mm, $d_0=14.8$ mm, $Q = 25$ ml/min). A: REK IN DE BUISWAND ALS FUNCTIE VAN TIJD, B: SPANNING IN DE BUISWAND ALS FUNCTIE VAN TIJD, C: DE GELIJKTijdIGE SPANNING EN REK TEGEN ELKAAR UITGEZET (BLAUW) EN DE BIJBEHORENDE FIT VAN DE TANGENTIËLE ELASTICITEITSMODULUS E (ORANJE).

Door $\sigma(t)$ en $\varepsilon(t)$ tegen elkaar uit te zetten wordt het spanning-rek diagram van de buiswand verkregen (zie Figuur 3c). De helling van het spanning-rekdiagram vlak voor het moment van falen is de tangentiële elasticiteitsmodulus, E_t . Voor materialen die bros scheuren geldt doorgaans dat het interval tot het punt van falen overeenkomt met nagenoeg ideale elastische vervorming en in dat geval komt de tangentiële elasticiteitsmodulus overeen met de Young's modulus van het materiaal. Specifiek voor cementhoudende materialen geldt echter dat er bij rek in de praktijk geen puur elastisch vervorming optreedt, maar een combinatie van elastische vervorming en plastische vervorming door het vormen van haarscheurtjes (Constantinides, 2002). De E_t die in deze benadering gevonden wordt is daarom niet de Young's modulus die hoort bij ideaal elastisch gedrag, maar geeft wel een relatie tussen de spanning en vervorming van AC op macroscopische schaal.

2.5 Microscopie

In eerste instantie was het plan om de breukvlakken te onderzoeken met behulp van microscopie om inzicht te krijgen in het verouderingsmechanisme. Na start van dit onderzoek bleek dat dit vanwege Arbo technische redenen in verband met asbestveiligheid niet uitvoerbaar was.

3 Resultaten

3.1 Geometrie

De resultaten van de sterktemetingen middels de barstdrukproef zijn weergegeven in Tabel 1. De bovenste helft betreft buisdelen die zijn bezweken tijdens de proef, de onderste buisdelen die niet zijn bezweken en waar lekkage optrad aan de multi-joint.

TABEL 1 OVERZICHT RESULTATEN VAN DE BARSTDRIKPROEF EN METINGEN MET GEORADAR

	ID Delft rapport	Geometrie		Sterkte		Conditie					
		L (mm)	d_{veld} (mm)	$\sigma_{f,do}$ (Mpa)	E_t (Gpa)	leeftijd (jaar)	storing	d_{min} (mm)	d_{gem} (mm)	$\sigma_{f,dmin}$ (Mpa)	
gebroken	D09930	870	17.0	12.4	2.4	63	0	15.6	16.3	13.4	
	168218	1040	14.8	16.9	7.1	47	1	10.3	12.3	24.2	
	0026-1	1010	15.0	10.7	2.7	61	0	12.7	13.8	12.6	
	D10365-1	950	14.5	8.3	1.9	65	0	8.0	10.2	15.1	
	D10915-1	1160	14.9	15.1	*	46	0	10.6	12.7	21.2	
	D161290	980	15.1	14.9	3.2	52	0	12.9	13.7	17.4	
	ONB03	890	15.6	14.4	2.1	46	1	12.8	13.6	17.6	
	P10427-01	890	14.8	14.2	2.8	52	0	12.3	13.6	17.0	
	P10915	1070	11.8	19.1	4.2	46	0	9.6	10.8	23.5	
	177340	830	14.6	11.3	2.8	58	1	11.9	13.1	13.9	
	IC17055-1	810	14.8	12.8	3.4	98	0	11.1	12.7	17.1	
	D09586-1	1170	13.0	9.6	3.8	65	0	11.5	12.0	10.9	
	x	177598	1140	12.5	12.0	3.6	59	1	10.7	11.6	14.0
	x	103679	890	15.0	16.3	*	_	1	_	_	_
x	DUN04	1100	14	10.4	3.1	51	0	13	_	11.2	
ongebroken	176851	940	14.6	>15.4	2.5	61	1	12.2	13.2	> 18.5	
	WMT01	760	15.6	>14.4	2.8	_	0	10.7	12.4	> 21.0	
	D9691-1	940	11.8	>22.5	5.9	53	0	10.4	10.9	> 25.6	
	maasbreessestr1	700	10.0	>26.5	*	_	0	_	_	_	
	maasbreessestr2	490	17.5	>16.9	*	_	0	_	_	_	
	maasbreessestr3	610	15.0	>17.3	*	_	0	_	_	_	
	maasbreessestr4	560	15.0	>18.0	2.5	_	0	_	_	_	
	DUN03	970	14	>18.9	2.4	51	0	13	_	> 20.1	
	DUN05	1060	14	>15.0	*	51	0	13	_	> 16.2	
	DUN 0607-2	840	14	>17.1	3.6	48	0	12	_	> 20.0	
	DUN001	1000	14	>15.0	4	51	0	12	_	> 17.5	
	DUN002	990	14	>21.1	3.7	51	0	12	_	> 24.6	
	DUN 0607-1	940	14	>16.8	3.2	48	0	12	_	> 19.6	

x = buiswand bevatte met CT zichtbare scheurtjes bij aanvang van de proef

* = er trad teveel lekkage op tijdens de proef om E_t te kunnen bepalen

_ = geen data beschikbaar

Georadar, rolmaat

Thymolfthaleine, schuifmaat

Delft, rolmaat

De geometrie van de doorgemeten buisdelen is samengevat in het eerste deel van Tabel 1. Voor de buizen die met Georadar zijn doorgemeten is een wanddikte bepaald door de buitendiameter te meten met een rolmaat. Voor buizen die met thymolftaleïne zijn beoordeeld is de wanddikte gemeten met een schuifmaat. In het lab van Delft zijn, waar nodig, deze waarden aangevuld met een meting van de buitendiameter met een rolmaat.

3.2 Sterkte-eigenschappen op basis van nominale wanddikte

Voor de bezweken buisdelen is de bezwijkspanning, $\sigma_{f,d0}$, bepaald op basis van de wanddikte en de druk bij falen zoals gerapporteerd door de TU-Delft (bijlage II). Omdat $\sigma_{f,d0}$ is gebaseerd op de nominale wanddikte, moet dit gezien worden als de gemiddelde wandspanning die optrad tijdens bezwijken. Op dezelfde manier is de maximale spanning die optrad in de buizen die niet zijn gesprongen bepaald. Omdat de buizen niet zijn gesprongen moet deze spanning worden gezien als een ondergrens voor de daadwerkelijke gemiddelde bezwijkspanning. Deze eigenschappen zijn samengevat in het tweede gedeelte van Tabel 1. De bezwijkspanningen van de buizen die daadwerkelijk zijn bezweken varieert van 8.8 tot 19.2 MPa met een gemiddelde van 13.9 MPa. De ondergrens van de bezwijkspanningen van de buizen die niet zijn bezweken varieert van 14.4 tot 23.2 MPa met een gemiddelde ondergrens van 17.7 MPa.

Voor de buizen waarvoor metingen zonder lekkage van bezweken en niet-bezweken leidingen beschikbaar zijn, is de tangentiële elasticiteitsmodulus, E_t , bepaald zoals beschreven in paragraaf 2.4. De tangentiële elasticiteitsmodulus van de buizen die zijn bezweken varieert van 1.9 tot 7.1 GPa met een gemiddelde van 3.4 GPa. De tangentiële elasticiteitsmodulus van de buizen die niet zijn bezweken kan hier worden gezien als een ondergrens.

Verder is opvallend dat de leidingen die tijdens de proef zijn bezweken een gemiddelde leeftijd hebben van 58 jaar en die niet zijn bezweken een gemiddelde leeftijd van 62 jaar. Van de vijftien buizen die zijn bezweken zijn er vijf uitgenomen als gevolg van een storing. Van de dertien buizen die niet bezweken gold dat slechts voor één buis.

3.3 Sterkte-eigenschappen op basis van restwanddikte

Wanneer de (effectieve) buiswand dunner wordt door aantasting, treden op dat punt hogere spanningen op omdat de belasting over een kleiner wand oppervlak verdeeld worden. Aangenomen dat de buis bezwijkt op het zwakste punt, moet men dus de minimum restwanddikte kennen om de werkelijke materiaalspanning die leidde tot falen te bepalen. Daarom worden de uitkomsten van de proeven gekoppeld aan de conditiebepalingen die vooraf zijn uitgevoerd met georadar of thymolftaleïne.

Voor de buizen die zijn doorgemeten met Georadar zijn de minimum en gemiddelde gemeten restwanddikten opgenomen in het derde gedeelte van Tabel 1. Voor de buizen die zijn beoordeeld met een thymolftaleïne test is in deze tabel de minimum restwanddikte opgenomen. Het valt op dat alle buizen in meer of mindere mate uitloging vertonen. Op basis van de CT beelden uitgevoerd voor aanvang van de barstdrukproef is vastgesteld dat in een aantal buisdelen reeds kleine scheurtjes aanwezig waren. Deze buizen moeten worden uitgesloten van verdere analyse omdat het niet is uit te sluiten dat de scheurtjes een grotere rol spelen in het falen dan de restwanddikte.

Vervolgens is op basis van de minimale restwanddikte de bezwijkspanning herberekend als $\sigma_{f,dmin}$ en opgenomen in het derde gedeelte van de tabel. Waar $\sigma_{f,d0}$ een gemiddelde

bezwijkspanning is van een combinatie van uitgeloozd en niet-uitgeloozd materiaal, is $\sigma_{f,dmin}$ de spanning die tijdens bezwijken optrad in het zwakste punt van de buis.

$\sigma_{f,dmin}$ mag gezien worden als de werkelijke bezwijkspanning van het niet uitgeloozde materiaal in de buis onder drie aannames. Ten eerste moet worden aangenomen dat het niet-uitgeloozde deel van het AC veel sterker is dan het uitgeloozde deel. Dit lijkt redelijk op basis van bestaande literatuur (bijv. Carde et al., 1996). Ten tweede moet worden aangenomen dat het initiatiepunt van scheuren op het punt van maximale uitloging plaatsvond. Tenslotte moet worden aangenomen dat de conditiebepalingen de werkelijke minimum restwanddikte hebben opgeleverd. Of deze laatste twee aanname correct zijn zou wellicht kunnen worden vastgesteld met een kwantitatieve analyse van de CT-beelden.

4 Chemische degradatie van asbestcementbuizen

4.1 Motivatie en aanpak

De aanleiding voor deze literatuurstudie is dat er asbestcementbuizen met onvoldoende reststerkte worden gevonden waarbij een thymolftaleïnetest geen uitloging aanwijst. Hierdoor doet zich de vraag voor of de reststerkte van buizen kan afnemen via andere processen dan uitloging van het cement uit de buiswand. Uit een literatuurverkenning blijkt dat ook uitwisselingsreacties, zoals met ammoniumnitraat [Cement & Beton Centrum, 2014] hiervoor een kandidaat kunnen zijn. Het doel van deze literatuurstudie is om inzichtelijk te maken op welke manier uitwisselingsreacties tot degradatie van asbestcementbuizen kunnen leiden zonder dat dit meetbaar is met een thymolftaleïnetest. Dergelijke mechanismen zouden de oorzaak kunnen zijn van de in de praktijk waargenomen ‘peperkoekbuizen’ waarbij geldt dat er geen sterkte aanwezig is, maar waar wel over de hele wanddikte verkleuring optreedt met thymolftaleïne.

De chemische degradatie van asbestcementbuizen wordt typisch gelijkgesteld aan de chemische degradatie van het cement daarin [Sathiyaseelan *et al.*, 2009; Delgadillo *et al.*, 2016]. Een van de kwalificerende eigenschappen van asbest is dat het resistent is tegen chemische degradatie, maar er zijn asbesttypen die aangetast kunnen worden door zuren [WHO, 1996, Kusiorowski, 2012]. Zuren die asbest aantasten zullen echter ook het cement aantasten met neutralisatiereacties die leiden tot een met thymolftaleïne meetbare verlaging van de pH van het cement (zie ook paragraaf 4.3 en 4.4). Daarom concentreert dit hoofdstuk zich op de chemische aantasting van het cement, maar niet op de aantasting van het asbest.

Uitwisselingsreacties zijn een brede groep van chemische reacties. Er zijn verschillende typen uitwisselingsreacties die een rol kunnen spelen bij de chemische degradatie van cement. Om de effecten van uitwisselingsreacties op cement en de meetbaarheid van die effecten met thymolftaleïne helder toe te lichten, wordt in dit hoofdstuk eerst aandacht besteed aan chemische samenstelling van cement, uitloging en de thymolftaleïnetest. In paragraaf 4.2 wordt een korte beschrijving gegeven van de chemische samenstelling en microscopische structuur van cement. In paragraaf 4.3 worden het proces van uitloging en het effect hiervan op de structuur en reststerkte van cement toegelicht. Daarna wordt de werking van de thymolftaleïnetest voor uitloging kort beschreven.

Vervolgens wordt in paragraaf 4.4 een overzicht gegeven van de verschillende chemische degradatiemechanismen die optreden wanneer cement wordt blootgesteld aan “aanvallende” stoffen. Het overzicht wordt geïllustreerd met twee voorbeelden waarin steeds voor één aanvallende stof de verschillende uitwisselingsreacties worden beschreven die optreden. Tenslotte worden de mechanismen aangewezen die tot sterkteverlies kunnen leiden zonder dat de thymolftaleïnetest dit kan aanwijzen.

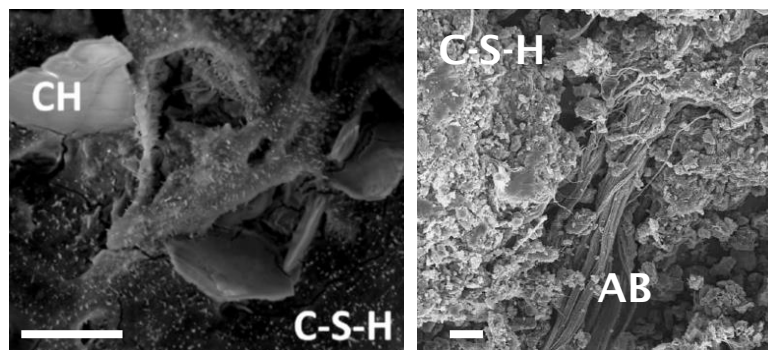
4.2 Chemische samenstelling en microstructuur van cement

Het cement in asbestcement buizen bestaat uit een complexe mix van zouthydraat-microkristallen en een poreuze zouthydraat ‘gel’. Gel betekent hier dat het materiaal bestaat uit een gecrosslinkt systeem van colloïdale deeltjes en water en dat geen kristalstructuur heeft, maar zich in rusttoestand wel als vaste stof gedraagt. De gel is erg stevig en bindt de

kristallen en de asbestvezels. De inbedding van de kristallen en asbestvezels zorgt voor extra mechanische sterkte in het materiaal. Figuur 4 toont via elektronenmicroscopie microkristallen (1a) en asbestvezels (1b) die zijn ingebed in de amorfe, poreuze matrix van de gel.

De componenten van de zouthydraatgel zijn calciumoxide (C of CaO), siliciumdioxide (S, of SiO₂) en water (H, of H₂O). Tussen haken wordt steeds eerst de notatie uit de cementchemie gegeven, en daarna de algemene chemische aanduiding. De verzameling van deze hydraten wordt calciumsilicaathydraat of cementsteen genoemd, en wordt aangeduid met C-S-H. De 's' benadrukt daarbij dat de onderlinge structuur en samenstelling van individuele moleculen kan blijven veranderen. De structuur van C-S-H is erg complex en blijft het onderwerp van uitgebreid onderzoek [Jennings, 2008].

Het zoutkristal dat doorgaans het meest voorkomt in cement is het hydraat van calciumoxide, calciumhydroxide of portlandiet (CH, of Ca(OH)₂). In mindere mate zijn er typisch ook hydraten aanwezig van andere zouten. Portlandcement, een breed toegepaste cementsoort, bevat bijvoorbeeld ook aluminiumoxide (A, of Al₂O₃), magnesiumoxide (M, of MgO), ijzeroxide (F, of Fe₂O₃) en zwaveloxide (S, of SOH₄) [Cantor & Hill, 2011].



FIGUUR 4 SCANNING ELECTRON MIRCOSCOPY AFBEELDINGEN VAN CEMENT. LINKS: CALCIUMHYDROXIDE (CH) IS AANWEZIG IN DE VORM VAN KRISTALLEN DIE ZIJN INGEBED IN DE AMORPHE CALCIUMSILICAATHYDRAAT GEL (C-S-H) [OVERGENOMEN UIT MANZANO ET AL., 2012]. RECHTS: ASBESTVEZELS (AB) ZIJN OP EENZELFDE MANIER INGEBED IN DE C-S-H [OVERGENOMEN UIT COMPOPIANO ET AL., 2009]. DE BALKEN IN DE FIGUREN GEVEN DE SCHAAL AAN EN KOMEN OVEREEN MET 20 MICROMETER.

De specifieke materiaaleigenschappen van cement worden bepaald door de precieze verhoudingen van C-S-H en de verschillende kristallen die al dan niet aanwezig zijn. Deze verhoudingen zijn sterk afhankelijk van het productieproces van het materiaal. De initiële samenstelling van de cementklinker is bijvoorbeeld van belang, maar bijvoorbeeld ook de toegevoegde hoeveelheid water en de eventuele inmenging van additieven zoals gips, hoogovenslak of quartz [EN-197:1; Leroy *et al.*, 1996; Panda, 2016]. Het precieze fabricageproces en de gebruikte toeslagstoffen zijn niet achterhaald voor asbestcement buizen. De grondslag voor de normering van asbestcementbuizen was het rapport van de Studiecommissie Asbestcementbuizen in 1948, wat is beschreven en herzien in Kiwa mededeling 5 [Kiwa, 1958]. Op onder andere dit rapport werden later de nationale normen, NEN 3262:1969-1988, en internationale normen, ISO 160:1960-1980, gebaseerd [Hünerberg, 1963; Wagenmaker 1969; Bijleveld, 1974]. Het gebruikte cement moest daarbij voldoen aan N481, later vervangen door NEN 3550:1979-1995. Portlandcement wordt genoemd als het specifieke type cement dat in asbestcementbuizen werd gebruikt [Kiwa,

1958; Hünerberg, 1963; Eternit, 1980?]. Verder blijkt uit publicaties van Eternit [de Glee, 1950; Wagenmaker 1969; Bijleveld, 1974; Eternit, 1980?] geen gebruik van toeslagstoffen, maar wel een kleine toegevoegde hoeveelheid water.

Bij chemische degradatie reageert een “aanvallende” stof met een of meerdere componenten van het asbestcement, waardoor de verhoudingen van componenten verandert en de materiaaleigenschappen veranderen. Verschillende aanvallende stoffen kunnen met verschillende componenten van het asbestcement reageren, en verschillende reacties kunnen verschillende materiaaleigenschappen veranderen (voorbeelden volgen in paragraaf 0en 0). Daarom is er niet één chemische reactie aan te wijzen die eenduidig de degradatie van asbestcementbuizen beschrijft.

4.3 Uitloging en de thymolftaleïne test

Men spreekt van uitloging wanneer chemische componenten aan een vaste stof worden onttrokken door middel van oplossing in een extern medium. In het geval van de aantasting van asbestcementbuizen lossen CH kristallen op uit het cement wanneer dit in aanraking komt met water. Andere kristallen lossen in latere stadia van uitloging ook op. Als de kristallen uit de cementmatrix verdwijnen, ondersteunen ze de matrix niet meer en wordt het materiaal lokaal zwakker. Daarnaast kunnen er uiteindelijk ook calcium ionen uit de C-S-H gel oplossen waardoor er silicagel (kieselzuur) achterblijft. Silicagel heeft een lager bindend vermogen dan C-S-H, dus dit verzwakt het materiaal verder. De uitloging van CH is doorgaans het belangrijkste voor de afname in sterkte, gevolgd door de gedeeltelijke oplossing van C-S-H [Carde & Francois, 1996].

Wanneer CH in oplossing gaat, stijgt de lokale concentratie van Ca^{2+} en OH^- ionen in het water. De stijgende concentratie zal verdere oplossing vertragen. Door diffusie kunnen de opgeloste ionen echter weer afgevoerd worden, waardoor de concentratie in de buurt van de kristallen weer daalt en oplossing opnieuw mogelijk wordt. Het gemak waarmee ionen door de poreuze matrix van het cement kunnen diffunderen is daarom sterk bepalend voor de snelheid van uitlogingsproces. Het proces van de uitloging van CH versnelt zichzelf. Opgeloste kristallen laten nieuwe poriën achter, waardoorheen extra diffusie kan optreden. Ionen kunnen vervolgens sneller worden afgevoerd, zodat nieuwe kristallen sneller kunnen oplossen.

Het samenspel van oplossing en diffusie leidt tot het ontstaan van een uitlogingsfront dat steeds dieper het materiaal indringt: aan het materiaaloppervlak ontstaat een steeds dikkere laag van uitgelooft cement, met daarachter het dieper gelegen materiaal dat nog niet is aangetast. Onderzoek heeft uitgewezen dat indringen van het uitlogingsfront in een cementen object een proportionele afname in reststerkte tot gevolg heeft [Carde & Francois, 1996; Carde & Francois, 1997, Carde *et al.*, 1999]. Dit is waarom er doorgaans aangenomen wordt dat men na uitloging van een ‘effectieve wanddikte’ kan spreken. Merk wel op dat volledige uitloging van CH de sterkte van cement wel vermindert, maar niet tot nul reduceert.

De verschillende componenten van cement zijn sterk basisch en veroorzaken een hoge pH wanneer ze in oplossing gaan. Poriewater van onaangetast cement is verzadigd met onder andere calciumhydroxide en heeft een pH van meer dan 13 [Cantor & Hill, 2011]. Fenolftaleïne en thymolftaleïne zijn pH indicatoren. Fenolftaleïne is kleurloos wanneer het aanwezig is in oplossingen met een $\text{pH} < 8.2$, en verkleurt geleidelijk naar roze wanneer de pH hoger wordt, met maximale verkleuring bij een $\text{pH} > 10$. Thymolftaleïne verkleurt van kleurloos bij $\text{pH} < 9.4$ naar blauw bij $\text{pH} > 10.6$ [Binas, 1992]. Wanneer een kleine hoeveelheid

van een oplossing van een van deze indicatoren aangebracht wordt op een onaangetast cement oppervlak, zal het cement hierin oplossen waardoor de pH stijgt en de oplossing verkleurt. Als cement echter voldoende uitloopt, is de resterende hoeveelheid oplosbaar CH en C-S-H aan het oppervlak zo laag dat de pH van de aangebrachte testoplossing onder de grenswaarden van de indicatoren blijft. In dat geval blijft de ingemengde indicator dus kleurloos.

Een uitlogingsfront op een cementoppervlak kan zichtbaar gemaakt worden door thymolftaleïne of fenolftaleïne correct op het oppervlak aan te brengen [Sterk & van de Lisdonk, 1999]. Het is belangrijk om op te benadrukken dat fenolftaleïne en thymolftaleïne pH indicatoren zijn en niet indicatoren voor specifieke stoffen of cementverbindingen. Degradatieprocessen die de pH niet of beperkt verlagen (bijvoorbeeld doordat ze voldoende CH of andere basische stoffen achterlaten) kunnen met behulp van deze indicatoren niet zichtbaar gemaakt worden.

4.4 Uitwisselingsreacties

De enige voorwaarde voor degradatie van cement via uitloging is contact met water (of andere vloeistof) waarin Ca^{2+} en OH^- ionen oplosbaar zijn. Zulk water kan echter ook nog andere opgeloste stoffen bevatten die het cement verder kunnen degraderen via chemische reacties. De stoffen die een rol spelen bij de chemische degradatie van cement zijn doorgaans zouten of zuren. De reacties die optreden zijn doorgaans substitutiereacties of uitwisselingsreacties. Substitutiereacties zijn reacties die verlopen volgens schema (1):



Uitwisselingsreacties, ook wel metathesereacties genoemd, zijn reacties die verlopen via schema (2):



De uitwisselingsreacties zijn een erg brede groep van chemische reacties. Alle neutralisatiereacties van zuren en basen en alle neerslagreacties tussen twee opgeloste zouten zijn bijvoorbeeld uitwisselingsreacties. Vergelijking van (1) en (2) toont al dat substitutiereacties nauw verwant zijn aan uitwisselingsreacties; in het Engels worden substitutie en uitwisseling dan ook respectievelijk aangeduid als single- & double exchange reactions.

Er zijn tientallen relevante stoffen die cement kunnen degraderen via uitwisselingsreacties. Afhankelijk van de stof zal er worden gereageerd met één of meerdere componenten van het cement. Reacties zijn mogelijk met de verschillende zoutkristallen, de C-S-H gel, of met de oplossingsproducten hiervan. Verdere reacties met reactieproducten zijn ook mogelijk, waardoor kettingreacties ontstaan. Dit kan het degradatieproces erg complex maken. De precieze manier en volgorde van chemische degradatie zal altijd moeten worden beschouwd vanuit de specifieke aanvallende stof. Ook de precieze manier waarop vervolgens de reststerkte van het cement wordt aangetast is afhankelijk van de aanvallende stof. Er zijn ruwweg drie manieren waarop uitwisselingsreacties met aanvallende stoffen de reststerkte van cement kunnen verminderen:

1. Er zijn reacties die leiden tot het versneld oplossen van componenten van de cement matrix, parallel aan reguliere uitloging.

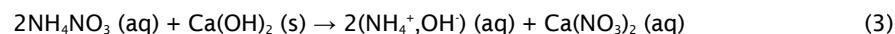
2. Er zijn reacties die de chemische samenstelling van de cement matrix kunnen veranderen, waardoor deze zwakker wordt.
3. Er zijn reacties die leiden tot de vorming van nieuwe, sterk groeiende zoutkristallen die de cementmatrix onder druk zetten, met sterkteverlies of zelfs microscheurvorming tot gevolg.

Een compleet overzicht van alle aanvallende stoffen, hun bijbehorende degradatiepatronen en de resulterende effecten op het cement valt buiten de strekking van dit hoofdstuk. Een lijst van mogelijke aanvallende stoffen kan bijvoorbeeld gevonden worden in [Cement & Beton Centrum, 2014]. Een uitstekende, brede beschouwing van de reactieketens en effecten van veelvoorkomende aanvallende stoffen is beschikbaar in [Alexander et al., 2013]. Om de principes, verscheidenheid en samenhang achter degradatie via uitwisselingsreacties te illustreren, worden hieronder voor twee relevante aanvallende stoffen de reactieketens en hun effect op de reststerkte van cement toegelicht.

Voorbeeld: uitwisselingsreacties met ammoniumnitraat

Ammoniumnitraat is een belangrijke aanvallende stof voor cement [Escadeillas, 2013]. De stof is praktisch relevant omdat ze veel gebruikt wordt in kunstmest en dus makkelijk in het milieu terecht kan komen. Daarnaast is de stof van belang in de context van experimenteel onderzoek, omdat reacties met ammoniumnitraat de effecten van reguliere uitloging imiteert en dus gebruikt kunnen worden om kunstmatig versnelde veroudering in samples teweeg te brengen [Carde & Francois, 1996; Carde & Francois, 1997, Carde *et al.*, 1999; Segura, 2013].

Wanneer ammoniumnitraat (NH_4NO_3) in oplossing aanwezig is in water, kan het een uitwisselingsreactie aangaan met het CH in het cement via:



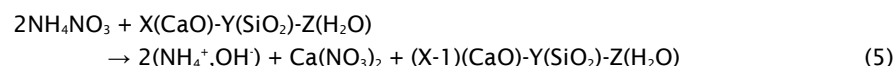
De term $(\text{NH}_4^+, \text{OH}^-)$ in (3) is een combinatie van een zuur en base. Deze component zal daarom meteen neutraliseren via een tweede uitwisselingsreactie:



Het zout calciumnitraat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) dat in (3) gevormd wordt is zo sterk oplosbaar dat het nagenoeg niet bijdraagt aan de verzadiging van het water met Ca^{2+} ionen, en de neutralisatie van het gevormde OH^- in (4) voorkomt dat het water verzadigd wordt met OH^- . De reguliere oplossing van CH (uitloging door contact met water) wordt dus niet geremd.

Uitwisselingsreacties met ammoniumnitraat leiden daardoor tot het sneller oplossen en afvoeren van CH (**effect type 1**).

Ammoniumnitraat kan op vergelijkbare wijze uitwisselingsreacties aangaan met de C-S-H matrix. Daarbij wordt een deel van de calciumoxide (CaO) aan de C-S-H gel onttrokken volgens onderstaande reactie:



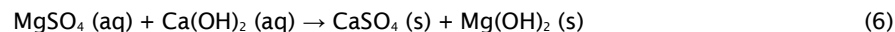
De term $(\text{X}-1)(\text{CaO})\text{-Y}(\text{SiO}_2)\text{-Z}(\text{H}_2\text{O})$ representeert daarbij de resterende C-S-H matrix waar één CaO aan onttrokken is. Uitwisselingsreactie (5) zal herhaaldelijk optreden en zal steeds meer CaO uit de C-S-H gel onttrekken. Daardoor verandert de chemische samenstelling van de gel en wordt de reststerkte van het cement aangetast (**effect type 2**). Merk op dat de andere

reactieproducten in (5) dezelfde zijn als die in (3), zodat ook (5) het reguliere uitlogingsproces niet zal remmen.

Dit voorbeeld demonstreert dat de aanwezigheid van één stof verschillende effecten kan hebben op de reststerkte van cement. Ook is het belangrijk om op te merken dat deze serie van uitwisselingsreacties met ammoniumnitraat uiteindelijk leidt tot een reductie van de pH in het materiaal vanwege de neutralisatie van OH⁻ via (4). Dit resulteert daarom net als reguliere uitloging in een uitlogingsfront waarvoor fenolftaleïne- en thymolftaleïne-testen gevoelig zijn, zoals bevestigd door de experimenten van bijvoorbeeld [Segura *et al.*, 2013]. De effecten van uitwisselingsreacties met ammoniumnitraat kunnen dus met thymolftaleïne worden gemeten.

Voorbeeld: uitwisselingsreacties met magnesiumsulfaat

Magnesiumsulfaat is een voorbeeld van een sulfaat zout dat cement aantast via uitwisselingsreacties [Menendez *et al.*, 2013]. Magnesiumsulfaat komt voor in de natuur in zoutlagen en wordt ook als kunstmeststof gebruikt. Opgelost magnesiumsulfaat gaat in de eerste plaats een uitwisselingsreactie aan met de oplosproducten van CH via:



Beide reactieproducten zijn slecht oplosbaar, en zullen dus neerslaan als nieuwe kristallen. Deze neerslagreactie verwijdert dus de Ca²⁺ en OH⁻ ionen van opgelost CH uit de oplossing, waardoor het reguliere uitlogingsproces versnelt (**effect type 1**). Daarnaast vormt één van de twee reactie producten, CaSO₄ (gips), een kristal met een relatief groot volume. Deze kristallen kunnen door expansieve groei de cementmatrix uit elkaar drukken en verzwakken (**effect type 3**). Het andere kristalvormige reactieproduct, magnesiumhydroxide (Bruciet), drukt cement niet uit elkaar, maar draagt ook niet bij aan de mechanische sterkte zoals het originele CH dat wel deed. Effectief leidt dit dus tot een reductie in mechanische sterkte. Wel kunnen de gips- en Brucietkristallen leiden tot verstopping van poriën, waardoor de diffusie van het reguliere uitlogingsproces juist met enige mate vertraagd wordt. Dit demonstreert de interactie tussen de verschillende degradatieprocessen.

Opgelost magnesiumsulfaat kan ook een complexe uitwisselingsreactie met de C-S-H gel aangaan, waarbij een mix van gips, magnesiumsilicaathydraat en silicagel gevormd worden. Gips heeft daar opnieuw een **effect type 3**, terwijl de vorming van magnesiumsilicaathydraat of silicagel leidt tot een verzwakking ten opzichte van de originele C-S-H (**effect type 2**).

Een secundair kristal dat vaak in cement voorkomt is calciumaluminaat, een hydraat van Al₂O₃ en Ca(OH)₂. Dit kristal kan reageren met het gips dat gevormd wordt in bovengenoemde reacties tot het kristal Ettringiet. Dit kristal is nog veel expansiever dan gips en leidt daarom tot een nog sterkere degradatie van het **type 3**. Portlandcement, het cement dat gebruikt werd in asbestcementbuizen (zie paragraaf 4.2) bevat typisch calciumaluminaat, en is daarmee gevoelig voor dit proces [Leroy *et al.*, 1996; Cement & Beton, 2014b]. Portlandcementklinker die op basis van het productieproces minder aluminiumoxide bevat, resulteert in lagere hoeveelheden calciumaluminaat in het cement. De reductie van aluminiumoxide in de klinker is echter niet voorgeschreven in de normen voor asbestcementbuizen [Kiwa, 1958; NEN 3262:1969-1988], en wordt niet genoemd door publicaties van Eternit [de Glee, 1950; Wagenmaker, 1969; Bijleveld, 1974; Eternit, 1980?].

Dit voorbeeld laat opnieuw zien dat één stof verschillende uitwisselingsreacties met cement teweeg kan brengen. Het is onduidelijk hoe groot de netto effecten van deze reacties zullen

zijn op de pH van het aangetaste materiaal. Enerzijds zal de vorming van nieuwe kristallen het reguliere uitlogingsproces vertragen, anderzijds treed er een verlaging van de pH in het materiaal op vanwege de verwijdering van $\text{Ca}(\text{OH})_2$ via (6) [Piasta et al., 2014]. Het is denkbaar dat de type 3 effecten het materiaal substantieel kunnen verzwakken zonder dat er zoveel $\text{Ca}(\text{OH})_2$ verwijderd wordt dat dit zichtbaar gemaakt kan worden met thymolftaleïne of thymolftaleïne.

4.5 Onderzoek naar degradatie van asbestcementbuizen

Samenvattend zijn er uitwisselingsreacties denkbaar die leiden tot degradatie die niet vast te stellen is met thymolftaleïne. De voorwaarde daarvoor is dat de verschillende reacties tussen de aanvallende stof en het cement de pH niet onder de 10 brengen. Verschillende uitwisselingsreacties (en reguliere uitloging) kunnen echter parallel optreden, en één aanvallende stof kan verschillende reacties teweeg brengen. Het is daarom moeilijk om a priori stoffen aan te wijzen die buizen sterk verzwakken zonder de pH onder het omslagpunt van thymolftaleïne (9.4) te brengen.

Op basis van het hier uitgevoerde literatuuronderzoek valt te verwachten dat sterke zuren of andere stoffen die agressief zijn voor calciumhydroxide waarschijnlijk geen peperkoekbuizen veroorzaken, omdat die bijna per definitie zullen leiden tot verlaging van de pH bij de thymolftaleinetest via effect type 1. Neutrale of basische stoffen die voornamelijk effecten van type 2 of 3 hebben, zoals natriumhydroxide, kaliumhydroxide, calciumsulfaat, natriumsulfaat of kaliumsulfaat [Cement & Beton Centrum, 2014; Piasta et al., 2014], zijn betere kandidaten.

Met name sulfaat-zouten staan bekend als erg gevaarlijk voor cement vanwege hun sterke effecten van type 3 [Menendez *et al.* 2013]. Degradatie door sulfaten in de grond wordt ook wel gezien bij asbestcementleidingen voor drinkwaterdistributie [Kiwa, 1958; Matti & Al-Adeeb, 1985]. Er zijn verschillende plaatsen in Nederland waar de bodem rijk is aan sulfaationen, zoals in de wijstgronden en kattezanden in Brabant, in kleilagen in Groningen en in de Gelderse vallei. Dit komt door interacties tussen daar gebruikte landbouwstoffen en pyriet in de grond. De precieze chemische samenstelling van de bodem is echter complex en bevat veel andere ionen van bijvoorbeeld natrium, calcium en ammonium. Het zal van de precieze samenstelling afhangen of interacties met stoffen in de bodem kunnen resulteren in 'peperkoekbuizen'.

Voor een bepaalde chemische aantasting zijn niet alleen de juiste chemische stoffen in het milieu nodig, maar deze moeten vervolgens ook doordringen in de buiswand. Juist als reguliere uitloging (en de resulterende toename in porositeit) door omstandigheden niet optreedt, is chemische degradatie van het materiaal door stoffen in de omgeving trager. Publicaties van Eternit vermelden bovendien dat ze juist een lage water-cement verhouding hanteerden om de porositeit en permeabiliteit van het materiaal te minimaliseren [de Glee, 1950; Kiwa, 1958; Wagenmaker, 1969; Bijleveld, 1974]. Er bestaat echter een proces, 'interne sulfaataanval', waarbij vertraagde reacties van het cement zelf leiden tot ettringietvorming in het materiaal zonder dat daar een externe aanvallende stof voor nodig is [Cement&beton, 2014b]. Expansie door ettringietvorming zou onzichtbaar zijn voor een thymolftaleïne test, want Ettringiet in cement is stabiel bij pH 10.6 of hoger, dus boven het omslagpunt van thymolftaleïne [Alexander *et al.*, 2013, Piasta *et al.*, 2014]. Zoals vermeld is meer informatie nodig over de samenstelling van het asbestcement om uitspraken over het optreden van ettringietvorming te kunnen doen.

Om vast te stellen welke stoffen verantwoordelijk zijn voor de 'peperkoekbuizen' is meer onderzoek noodzakelijk naar chemische reacties die ten grondslag liggen aan dit type degradatie. Een rol van effect type 3 zou kunnen worden bevestigd of uitgesloten door gedegradeerd materiaal te inspecteren met Scanning Electron Microscopy of andere kristallografische technieken die de aanwezigheid van nieuwgevormde kristallen zichtbaar maken. Indien bevestigd, zou dit ook uit kunnen wijzen of het gaat om vertraagde interne kristalvorming, of om een aanvallende stof uit de bodem. In het tweede geval zullen kandidaten voor dit fenomeen moeten worden geïdentificeerd. Met PHREEQC [Parkhurst & Appelo, 2013] zou een initiële scan kunnen worden gemaakt om aanvallende stoffen te identificeren die AC kunnen aantasten zonder de pH noemenswaardig te verlagen. Andersom kunnen metingen aan de chemische samenstelling van de bodem op de locatie van een 'peperkoekbuis' wellicht helpen bij de identificatie van de kandidaten.

5 Discussie

5.1 Met oog op de uitvoering van de proeven

Dit onderzoek geeft de resultaten weer van sterkteproeven uitgevoerd op AC-leidingen die door drinkwaterbedrijven uit het leidingnet zijn uitgenomen. Vanwege het werken met AC zijn in het project uitgebreide organisatorische en beschermende maatregelen noodzakelijk gebleken. Tijdens de uitvoering bleken er echter aanvullende eisen gesteld te worden voor het kunnen uitnemen van buizen en voor het uitvoeren van de drukproef. Deze voorzorgmaatregelen bleken van grote invloed op de uitvoering van sterkteproeven op AC buisdelen. Voor eventuele toekomstige proeven zal nog meer dan al in dit project is gedaan, een zeer gedetailleerde planning inclusief afspraken met alle betrokken partijen noodzakelijk zijn. Een en ander heeft consequenties voor de planning en het budget.

Een belangrijke constatering is dat het proces van uitname en logistiek in de praktijk complex is. Drinkwaterbedrijven moeten hiervoor afspraken maken met aannemers die strikte afspraken hanteren voor wat betreft het werken met AC buizen. Tevens blijkt het in de praktijk lastig om specifieke afspraken te maken. Aan de drinkwaterbedrijven was bijvoorbeeld gevraagd om de bovenzijde van de buisdelen te markeren. Dit bleek echter in de praktijk niet haalbaar. Dit betekent dat niet kon worden nagegaan hoe het aantastingspatroon zich verhoudt tot de ligging van de buis in omtreksrichting.

Door het werken in een geïsoleerde ruimte waarbij alle materialen na uitvoering van de meting vernietigd of grondig gereinigd moeten worden, bleken bepaalde metingen moeilijk uitvoerbaar. Het was bijvoorbeeld niet mogelijk om de vervorming te meten met een hogesnelheidscamera, zoals oorspronkelijk in de planning was opgenomen. Daarom is gebruik gemaakt van de minder nauwkeurige meetmethode van volumemeting. Het vervaardigen van proefsamples voor microscopie en mechanische analyse in andere laboratoriumruimte was qua veiligheid onmogelijk. Door het ontbreken van de mechanische analyse was de vaststelling van de Poisson's ratio niet mogelijk. Sterkteberekeningen zoals die in Comsima blijven daarmee afhankelijk van cataloguswaarden.

Voor het uitvoeren van de sterkteproeven zijn de uiteinden van de buizen voorzien van multi-joints. De aansluiting van de buizen met de multi-joints bleek bij de uitvoering van de proeven van grote invloed. Deze multi-joints dienen met veel zorg aangebracht te worden. Toch bleek dat in dertien van de achtentwintig buizen de multi-joint ging lekken voordat de buis bezweek. Gezien het type multi-joint en de zorg waarmee de TU-Delft de proeven heeft uitgevoerd, is het niet te verwachten dat een hogere afsluitdichtheid mogelijk is zonder modificatie van de proefstukken door bijvoorbeeld het polijsten of impregneren van de uiteinden. Voor de buizen die niet tot barsten konden worden gebracht zijn geen uitspraken mogelijk over de definitieve reststerkte.

5.2 Met oog op de resultaten van de proeven

De tangentiële elasticiteitsmodulus E_t van de beproefde buisdelen is redelijk consistent rond de 3 GPa (zie Figuur 5A), te weten 77% van de waarden bevindt zich tussen 2.0 en 4.0 GPa. Een spreiding in de waarden is te verwachten, aangezien E_t overeenkomt met de gemiddelde waarde van het uitgeloopte en niet-uitgeloopte materiaal in de buis, en het aandeel uitgeloopt materiaal is niet gelijk voor alle buizen. De gemeten waarde van de tangentiële elasticiteitsmodulus is aanzienlijk lager dan de 25 GPa zoals gegeven in catalogi

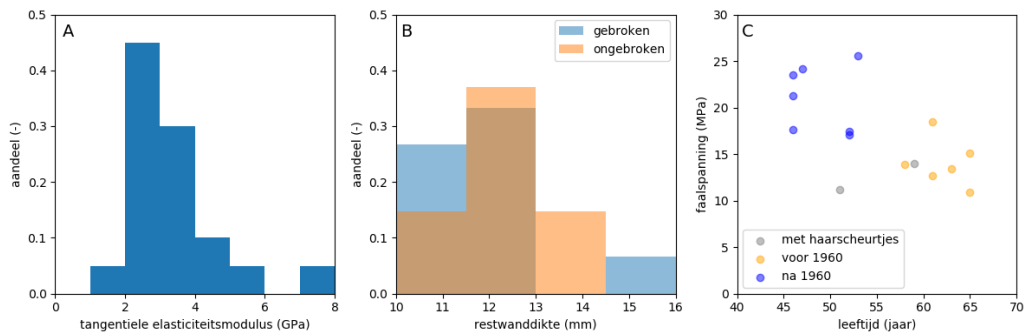
(bijvoorbeeld Eternit, 1980?). De mogelijke verklaring hiervoor is dat de waarde zoals vastgelegd is in catalogi is gebaseerd op puur elastische vervorming zonder optreden van scheurtjes in het materiaal zoals benoemd in paragraaf 2.4. Aangezien puur elastische vervorming niet of nauwelijks optreedt bij de macroscopische vervorming van cement (Constantinides, 2002) is het aan te raden om deze lagere effectieve waarde te gebruiken in Comsima.

Kwantiel voor kwantiel hebben de buizen die braken tijdens de barstdrukproef een lagere restwanddikte (gemiddelde 11,6 mm) dan de ongebroken buizen (gemiddeld 11,9 mm), zie ook Figuur 5B. Er is echter ook substantiële overlap. Dit betekent dat er meer factoren een rol spelen dan alleen restwanddikte. Dit wordt ook gesuggereerd door de spreiding in waarden van $\sigma_{f,dmin}$ in Tabel 1. Wanneer uitloging de bepalende factor zou zijn, zou men verwachten dat de – voor de effectieve wanddikte gecorrigeerde – bezwijkspanning systematisch dicht bij een eenduidige bezwijkspanning van AC zou liggen. Eén factor die een rol zou kunnen spelen is de geometrie van het degradatieprofiel: het is denkbaar dat de minimum waarde voor restwanddikte zoals gemeten met radar de totale degradatie niet voldoende beschrijft om het bezwijken te verklaren.

De gecorrigeerde bezwijkspanningen kennen niet alleen een spreiding (tussen de 11 en de 24 MPa), maar liggen in de meeste gevallen ook significant onder de karakteristieke waarden die genoemd worden in verschillende bronnen. Normen uit het verleden stellen dat de bezwijkspanning (treksterkte) boven de 20 MPa (Eternit, 1964?), later 22.5 MPa (NEN 3262, 1969) en uiteindelijk 24.5 MPa (NEN 3262, 1988) moeten liggen. Een Eternit catalogus (Eternit, 1980?) noemt een eigenlijke waarde van 30 MPa. In de wetenschappelijke literatuur rond AC wordt een typische waarde van 33 MPa genoemd (Francios & Jaouen, 1987). In het KSLB – en later Comsima – wordt zelfs een waarde van 50 MPa aangehouden (Slaats, 2003; Trietsch, 2004; Beuken, 2011; Wols, 2015). Hoewel de data uit de huidige sterkteproeven te beperkt is voor een statistisch onderbouwde waarde, moeten er vraagtekens gesteld worden bij de huidige waarde van 50 MPa die in Comsima wordt gebruikt voor de bezwijkspanning van AC.

Een mogelijke verklaring voor de lage bezwijkspanningen is het gegeven dat uitloging in de buizen erg inhomogeen is. Geïsoleerde plekken van uitloging kunnen fungeren als spanningsconcentratoren die leiden tot spanningen in meer richtingen dan alleen de omtrekriching (triaxiale spanningen). Daarnaast geldt dat asbestvezels de AC-buis vooral in de omtrekriching versterken (AC is een *anisotroop* materiaal). Francios & Jaouen (1987) geven bijvoorbeeld aan dat de typische bezwijkspanning van het AC dat wordt gebruikt voor waterleidingen in de omtrekriching 33 MPa, in lengteriching 17 MPa en in radiale richting 6 MPa is. Het kan zijn dat triaxiale spanningen rond spanningsconcentratoren leiden tot falen bij andere, lagere spanningen. Een tweede mogelijke verklaring is dat de minimum restwanddikte gevonden met georadar/thymolftaleïne de werkelijke minimum restwanddikte onderschat. Als dit het geval is, golden er op het zwakste punt in de buis hogere spanningen dan nu uit de tests is afgeleid. Deze mogelijkheid wordt verder onderzocht in (van Laarhoven & van Summeren, 2019).

Afgezien van het feit dat oudere buizen een dunnere restwand kunnen hebben vanwege meer uitloging, is het ook denkbaar dat de nominale σ_f van AC varieert met leeftijd vanwege veranderende productieprocessen (zoals ook weerspiegeld in de steeds hogere normwaarden in bovengenoemde NEN normen). De data suggereert een ruwe correlatie (zie Figuur 5C). Voor leidingen ouder dan 1960 geldt een gemiddelde σ_f van 14,1 MPa en voor buizen die zijn aangelegd na 1960 geldt een gemiddelde σ_f van 20,9 MPa.



FIGUUR 5. A: HISTOGRAM VAN DE GEMETEN TANGENTIELE ELASTICITEITSMODULI. B: HISTOGRAM VAN DE RESTWANDDIKTEN, GEGROEPEERD OP DIE VAN GEBROKEN EN ONGEBROKEN BUIZEN. C: CORRELATIE TUSSEN LEEFTIJD EN FAALSPANNING, $\sigma_{f, \text{dmin}}$.

In eerder onderzoek is vastgesteld dat er een grote variatie is in de totale wanddikte van AC buizen (Beuken, 2016). Deze variatie is waarschijnlijk te wijten aan het feit dat de eisen minimum sterkte-eisen betreffen en dat de leidingen in de meeste gevallen met een dikkere wanddikte zijn gefabriceerd. In Beuken (2016) bleek dat de gemiddelde wanddikte van 157 buizen met een nominale diameter van 100 mm 14,2 mm te zijn met een standaard deviatie van 1,2 mm. Deze metingen zijn uitgevoerd met een duimstok en zijn daarmee als beperkt nauwkeurig te bestempelen. De wanddikte zoals gemeten bij de 18 georadarmetingen door de omtrek te meten met een rolmaat, bedroeg gemiddeld 14,4 mm met een standaarddeviatie 1,4 mm. Dergelijke gegevens vormen waardevolle invoer voor Comsima, omdat deze in de onzekerheidsanalyse helpen bij een betere inschatting van de aard van de zwakste schakel in een buis.

5.3 Met oog op het degradatiemechanismen

In het literatuuronderzoek is gevonden dat er uitwisselingsreacties zijn aan te wijzen die kunnen leiden tot degradatie die niet is vast te stellen met thymolftaleïne. Anders gezegd, er is op basis van literatuur een onderbouwing van het voorkomen van zogenaamde peperkoekbuizen. De vervolgvraag is of het mogelijk is de chemische reacties te identificeren die verantwoordelijk zijn voor dit proces, zodat de omvang en locatie van deze buizen is vast te stellen.

Eén mogelijkheid is om met elektronenmicroscopie de aanwezigheid ettringiet vast te stellen. Hiermee is kan worden nagegaan of de peperkoekbuizen veroorzaakt worden door interne of externe sulfaataanval. Het uitnemen van AC-buisdelen en vervaardigen van monsters leidt tot aanzienlijke bezwaren/kosten op arbobebied. Het is ook mogelijk om de bodemparameters vast te stellen en na te gaan of er in het geval van peperkoekbuizen bepaalde afwijkende parameters zijn, met name sulfaat-zouten. Dit heeft echter als nadeel dat chemische factoren vanuit het materiaal zelf niet meegenomen worden.

Tenslotte moet worden opgemerkt dat het denkbaar is dat peperkoekbuizen worden veroorzaakt door mechanische in plaats van chemische processen, zoals cyclische werking van de bodem, bijvoorbeeld in opeenvolgend vochtige en droge klei bodems (Ellison and Spencer, 2016). Een meer algemene en meer eenvoudige mogelijkheid om het optreden van peperkoekbuizen beter te begrijpen is om criteria op te stellen voor peperkoekbuizen die eenvoudig in het veld zijn te hanteren en vervolgens gebieden of aanlegperioden te identificeren met een hogere kans van voorkomen.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies van dit onderzoek

1. Modellen voor conditiebepaling en restlevensduurvoorspelling, zoals Comsima, maken voor de materiaaleigenschappen van AC leidingen gebruik van cataloguswaarden. In dit onderzoek zijn met behulp van sterkteonderzoek waarden gemeten voor de bezwijkspanning en de elasticiteitsmodulus die substantieel afwijken van de cataloguswaarden/normen. Opgemerkt wordt dat de omvang van deze proef beperkt was; de waarden zijn gebaseerd op 28 buisdelen, waarvan er slechts 15 bezweken.
2. De bezwijkspanning van de 15 bezweken buizen varieert van 8.8 tot 19.2 MPa met een gemiddelde van 13.9 MPa en zijn daarmee substantieel lager dan de cataloguswaarde van 30 MPa (Eternit, 1980?) en de normwaarden van 20 tot en met 24.5 MPa (NEN 3626, 1964, 1969, 1988).
3. De tangentiële elasticiteitsmodulus van de 15 bezweken buizen varieert van 1.9 tot 7.1 GPa met een gemiddelde van 3.4 GPa en zijn daarmee substantieel lager dan de cataloguswaarde voor de Young's modulus van 25 GPa (Eternit, 1980?). In hoofdstuk 1 van dit rapport is aangegeven dat het meten van de Young's Modulus werd beoogd. In paragraaf 2.4 is aangegeven dat door het gecombineerd optreden van elastische en plastische vervorming de Young's modulus niet in deze proeven kon worden gemeten, maar wel de tangentiële elasticiteitsmodulus.
4. De metingen suggereren een afnemende bezwijkspanning bij een toenemende leeftijd of afnemend aanlegjaar (zie Figuur 5C).
5. Het uitvoeren van materiaalonderzoek aan AC buisdelen, inclusief de activiteiten voor het verzamelen en transporteren van proefstukken, vergt een aanzienlijke voorbereiding en een nauwkeurige planning met alle betrokken partijen. Tevens geldt dat de kosten voor uitvoering van deze proeven relatief hoog zijn.
6. Er zijn chemische degradatiemechanismen denkbaar die leiden tot aantasting van de buissterkte zonder een pH verandering teweeg te brengen, waardoor deze degradatie niet meetbaar is met een thymolftaleinetest. Sulfaataanval lijkt hiervoor de meest aannemelijke kandidaat.

6.2 Aanbevelingen

1. De noodzaak om te komen tot meer kennis over degradatie van AC in combinatie met de praktische bezwaren voor de uitvoering van de hiervoor benodigde proeven, vergt een standpuntbepaling van de bedrijfstak hoe om te gaan met toekomstig AC-onderzoek. In het licht van dit onderzoek is het aan te bevelen dat de drinkwaterbedrijven met KWR een discussie voeren over de mogelijkheden, nut en noodzaak van het kennen van de materiaaleigenschappen van AC. Indien het antwoord van bovenstaande discussie positief is, zijn onderstaande vervolgstappen aan te bevelen.
2. Om meer inzicht te krijgen in het ontstaan van 'peperkoekbuizen' worden de volgende stappen voorgesteld:
 - stel een formele definitie vast voor 'peperkoekbuizen' en registreer deze systematisch – bijvoorbeeld in USTORE. Heb hierbij ook oog voor omgevingsparameters, zoals bodemeigenschappen;
 - laat samples van 'peperkoekbuizen' onderzoeken met kristallografische technieken om het optreden van sulfaataanval of het optreden van andere expansieve kristalvorming te bevestigen of uit te sluiten;

- test de chemische samenstelling van de bodem rond ‘peperkoekbuizen’ zodat kan worden vastgesteld of er sprake is van sulfaataanval zoals beschreven in dit rapport en om andere mogelijke aanvallende stoffen te identificeren.
3. Om te komen tot betrouwbaardere voorspellingen voor AC in het conditiemodel Comsima worden de volgende stappen aanbevolen:
- Onderzoek of de tangentiële elasticiteitsmodulus een gepastere parameter is dan de Young’s modulus om de relatie tussen belasting en vervorming van AC buizen in de bodem te beschrijven. De eerste stappen van onderzoek hiertoe bestaan uit literatuurstudie en het raadplegen van experts uit de academie.
 - Verifieer dat de bezwijkspanningen van AC die in dit onderzoek zijn gemeten correct zijn. Als dit het geval is, pas dan de huidige waarde in Comsima (50 MPa) aan. De eerste stappen zijn:
 - bepaal aan de hand van de CT beelden die parallel aan de sterkteproeven zijn verkregen of de minimum wanddikten die zijn bepaald met georadar/thymolftaleïne correct zijn;
 - als dit niet het geval is, bepaal dan met behulp van de scans de werkelijke minimumwanddikte op het breukvlak en voer een herberekening van de bezwijkspanning.
 - Onderzoek met behulp van een eindige elementen model (FEM) of inhomogene uitloging leidt tot spanningsverdelingen die substantieel afwijken van de spanningsverdelingen die worden aangenomen in het model voor homogene uitloging dat wordt gebruikt in het KSLB/Comsima. Besteed daarbij aandacht aan de rol van de anisotrope bezwijkspanning van AC. Bepaal op die manier het belang van een lokale extreme aantasting ten opzichte van de gemiddelde aantasting voor het falen van een buis. Deze bevindingen vertellen ook hoe belangrijk het is om het werkelijke minimum te kunnen meten voor een goede conditiebepaling.
4. Vergelijk de CT beelden die parallel aan de sterkteproeven zijn verkregen met de meetdata van overige inspectietechnieken met als doel deze technieken te valideren en de meetresultaten te duiden.

7 Referenties

- Alexander M., Bertron A., de Belie N. (2013) Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments. Springer, New York
- Beuken, R. H. S., en Mesman, G. A. M., 2011, Kennissysteem Levensduurbepaling Versie 2.0, BTO 2011.113(s), KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- Beuken, R.H.S., G.A.M. Mesman, K. Laven, P. Horst, R. Diemel (2015) Practical application of acoustic propagation velocity measurement (APVM) for condition assessment of drinking water mains. *Water asset management international*. 11: 3-7.
- Beuken, R.H.S. (2016): Exitbeoordelingen AC leidingen bij WML, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, BTO 2016.094.
- Bijleveld J.G. (1974) Abestcement Buizen. H2O 11:212-216
- Binas (1992) Binas informatieboek vwo/havo voor het onderwijs in de natuurwetenschappen. 3^e druk, Wolters-Noordhoff, Groningen
- Campopiano A., Ramires D., Zakrewska A.M., Ferri R., d'Annibale A., Pizzutelli G (2009) Risk Assessment of the Decay of Asbestos Cement Roofs. *Ann Occup Hyg* 53:627-638
- Carde C., Francois R., Torrenti J.M. (1996) Leaching of both calciumhydroxide and C-S-H from cement paste: modeling the mechanical behavior. *Cement and Concrete Research* 26:1257-1268
- Carde C., Francois R. (1997) Effect of the leaching of calciumhydroxide from cement paste on mechanical and physical properties. *Cement and Concrete Research* 27:539-550
- Carde C., Francois R. (1999) Modelling the loss of strength and porosity increase due to the leaching of cement pastes. *Cement & Concrete Composites* 21:181-188
- Cement & Beton Centrum (2014) Chemische aantasting. Cement & Beton Centrum, 's Hertogenbosch
- Cement & Beton Centrum (2014b) Aantasting door sulfaten. Cement & Beton Centrum, 's Hertogenbosch
- Constantinides, G. (2002) The elastic properties of calcium leached cement pastes and mortars: a multi-scale investigation. PhD thesis, MIT, Massachusetts, USA.
- de Glee G.J. (1950) Fabricage en eigenschappen van asbest-cementbuizen. In: Drinkwatervoorziening – tweede vakantiecursus (1950). Moorman's periodieke pers, den Haag.
- Delgadillo H.H., Loendersloot R., Akkerman R., Yntema, D. (2016) Development of an Inline Water Mains Inspection Technology. *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings*
- Escadeillas G. (2013) Ammonium nitrate attack on cementitious materials. In: Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments. Eds. Alexander M., Bertron A., de Belie N. pp 114. Springer, New York
- Eternit (1964?) Boek van Eternit van onzeker jaar, persoonlijke communicatie met Henk de Kater, waterbedrijf Evides, in april 2019.
- Eternit (1980?) Catalogus voor asbestcementen persleidingen en hulpstukken van Eternit N.V. Noot: Dit vraagteken in de referentie geeft aan dat het jaar van publicatie van deze catalogus is geschat.
- Francois, Y. and Jaouen, C. (1987) mechanical behavior of the asbestos-cement container for geological disposal of a level technological wastes from cogema reprocessing plants. *INIS* 19:509-515. International Nuclear Information System, rapport number:19012361.
- Hünerberg K. (1963) Das Asbestzement Drukrohr. Springer-Verlag, Berlin
- Jennings H.M. (2008) Refinements To Colloid Model of C-S-H in Cement: CM-II. *Cement and Concrete Research* 38:275-289

- Kiwa (1958) Toepassing van asbestcementbuizen voor waterleidingen. Aanvullend rapport. Kiwa keuringsinstituut voor waterleidingartikelen n.v.
- Kusiorowski R., Zaremba T., Piotrowski J., Adamek J. (2012) Thermal decomposition of different types of asbestos. *J Therm Anal Calorim.* 109:693-704
- van Laarhoven, K.A., van Summeren, J.R.G. (2019) Röntgentomografie als meetmethode voor de toestand van asbestcementleidingen. BTO 2019.010, KWR, Nieuwegein
- Leroy P., Schock M.R., Wagner I., Holtschulte H. (1996) Cement based materials. In: AWWARF/DVWG-Technologiezentrum Wasser (1996) Internal corrosion of water distribution systems, 2nd edition. AWWA, Denver
- Ellison, D. and Spencer, D. (2016) The true causes of AC pipe failures – according to the data. In: Livingston, B.L., Pridmore, A., Geisbush, J., Cate III, C., and Heidrick, J.W. (Eds.) Out of sight, out of mind, not out of risk, proceeding of the Pipelines 2016 Conference, Kansas, Missouri, USA
- Manzano H., Enyashin A.N., Dolado J.S., Ayuela A., Frenzel J., Seifert G. (2012) Do Cement Nanotubes Exist? *Adv Mater* 24:3239-3245
- Matti M.A., Al-Adeeb A. (1985) Sulphate attack on asbestos cement pipes. *International Journal of cement composites and lightweight concrete.* 7:169-176
- Menendez E., Matschei T., Glasser F.P. (2013) Sulfate attack of concrete. In: Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments. Eds. Alexander M., Bertron A., de Belie N. pp 7. Springer, New York
- Mesman, G.A.M., R.H.S. Beuken en M.A. Meerkerk (2016) Conditiebepaling voor drinkwaterleidingen, KWR, PCD 6:2016.
- Panda H. (2016) The Complete Technology Book On Asbestos, Cement, Ceramics And Limestone. Asia Pacific Business Press Inc.
- Parkhurst, D., & Appelo, C. A. J. (2013). PHREEQC (Version 3): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *Water Resources Investigations Report*, 99–4259.
- Piasta W., Marczevska J., Jaworska M. (2014) Some aspects and mechanisms of sulphate attack. *Structure and Environment* 6:19-24
- Sathiyaseelan T., Liu Y., Loh E. (2009) Deterioration of Abestos-Cement Pipes. CEED seminar proceedings, Crawley
- Segura I., Molero M., Aparico S., Anaya J.J., Moragues A. (2013) Decalcification of cement mortars: Characterisation and modeling. *Cement & Concrete Composites* 35:136-150
- Slaats, P.G.G., G.A.M. Mesman (2003) Conditiebepaling asbestcement waterleidingen, Kiwa, Nieuwegein, BTO 2003.039
- Sterk G R, van de Lisdonk C A C (1999) Conditiebepalingsmethoden voor asbestcementleidingen. SWE 99.004, Kiwa, Nieuwegein.
- Trietsch, E.A. en Rosenthal, L.P.M. (2004) Centraal kennisstelsel Levensduurbepaling, BTO 2004.035, Kiwa N.V., Nieuwegein.
- Wagenmaker F. (1969) Asbestcementbuizen voor rioleringen. *H2O* 2:572-577
- WHO (1996) Asbestos in Drinking Water, Guidelines for drinking-water quality, 2nd ed. Vol. 2. World Health Organization, Geneva
- Wols, B. A. en A. Moerman (2017) Verouderingsmodule voor spanningsberekeningen in leidingen met Comsima., KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, BTO 2017.074.

Bijlage I Overzicht aangeleverde buisdelen

Tabel 2 geeft een overzicht van de proefstukken waarover informatie is aangeleverd. Dit overzicht betreft 34 buisdelen. Van 2 buisdelen van Brabant Water zijn georadarmetingen uitgevoerd, de buisdelen zijn echter niet aan de TU-Delft aangeboden. In totaal zijn derhalve 32 buisdelen aan de TU-Delft aangeboden, te weten 19 van Brabant Water, 7 van Dunea en 6 van WML. ER zijn georadarmetingen uitgevoerd op 18 buisdelen van Brabant Water en op 2 van WML. Dunea heeft Thymolftaleïnemetingen opgevoerd op 5 buisdelen.

Op de 32 buisdelen die aan de TU-Delft zijn aangeleverd zijn voorafgaand aan de sterktemeting CT-scans uitgevoerd. Van de 15 buisdelen die bezweken tijdens de sterkteproef zijn opnieuw CT-scans uitgevoerd. In dit rapport zijn de coderingen gehanteerd die zijn gebruikt door de TU-Delft. Deze kunnen vanwege slechte leesbaarheid soms afwijken van de door de bedrijven gehanteerde codering.

In totaal zijn 34 buizen uitgenomen: 21 door Brabant Water, 7 door Dunea en 6 door WML. Er zijn van dit overzicht 2 buizen niet aangeleverd. Van de 31 rechte buisdelen die zijn aangeleverd, bleek er 1 gebroken en brak er 1 tijdens het zagen ter voorbereiding van de sterkteproef. Bij nog een andere buis was geen sterktebeproeving mogelijk omdat er een aanboring was aangebracht. Sterkteproeven zijn derhalve uitgevoerd op 28 buisdelen. Zie Tabel 2 voor de details.

TABEL 2 OVERZICHT VAN AANGELEVERDE PROEFSTUKKEN

Bedrijf	Code TU-Delft	Straat	Plaats	Reden uitname	georadar	Thymolftaleïne	CT-scan 1	Sterkte	CT-scan 2	Opmerking
BW	D9691-1	Tureluursweg naast 5	Asten	sanering	x		x	x		
BW	D10365-1	Jan van Brabantstraat 2	Boxtel	sanering	x		x	x	x	
BW	-	Spoorbaanstraat 13	Breda	netverbetering	x		x			breuk bij op maat zagen
BW	177598	Zwarteweg	Budel Schoot	storing	x		x	x	x	
BW	168218	Eerste slagen	Den Bosch	storing	x		x	x	x	
BW	-	Derde Rompert nabij 111	Den Bosch	storing	x		x			Gebroken bij aankomst
BW	-	Brakenstraat 20	Drunen	sanering	x					Niet aangetroffen
BW	177340	Jan Heynslaan 94	Eindhoven	storing	x		x	x	x	
BW	176851	Zevenhuis 4	Landerd	storing	x		x	x		
BW	D09586-1	Spoorstraat 2	Mill en St. Hubert	sanering	x		x	x	x	
BW	-	Witte Weide Weg	Moerdijk	storing	x		x			aanboring in het midden
BW	0026-1	Bergsebaan 164	Roosendaal	sanering	x		x	x	x	
BW	-	jasmijnstraat 13	Roosendaal	sanering	x					Niet aangetroffen
BW	ONB03	Rooseveltlaan 4	Rosmalen	storing	x		x	x	x	
BW	D09930	Dorpsstraat 61	Someren	sanering	x		x	x	x	
BW	IC17055-1	Zeelberg 45	Valkenswaard	sanering	x		x	x	x	
BW	103679	Hintelstraat 19	Veghel	storing			x	x	x	
BW	D10915-1	Pottenbakker 46	Veldhoven	sanering	x		x	x	x	
BW	P10915	Glazenmaker 1	Veldhoven	sanering	x		x	x	x	
BW	P10427-01	Clivialaan 10	Waalre	sanering	x		x	x	x	
BW	D161290	Dahliastraat	Wernhout	sanering	x		x	x	x	
Dunea	DUN04	Griegstraat ?	Leiden	sanering		x	x	x	x	
Dunea	DUN03	Apolloolaan 17	Leiden	sanering		x	x	x		
Dunea	DUN05	Griegstraat ?	Leiden	sanering		x	x	x		
Dunea	DUN 0607-2	Beethovenlaan 55	Leiden	sanering		x	x	x		
Dunea	DUN001	Apolloolaan 17	Leiden	sanering		x	x	x		
Dunea	DUN002	Apolloolaan 17	Leiden	sanering		x	x	x		
Dunea	DUN 0607-1	Beethovenlaan 55	Leiden	sanering		x	x	x		
WML	maasbreessestr1	maasbreessestr1	Blerick	sanering	x		x	x		
WML	maasbreessestr2	maasbreessestr2	Blerick	sanering			x	x		
WML	maasbreessestr3	maasbreessestr3	Blerick	sanering			x	x		
WML	maasbreessestr4	maasbreessestr4	Blerick	sanering			x	x		
WML	WMT01	Arcen	DS Kingstraat	sanering			x	x		
WML	?	?	?	?	x		x			Bocht en scheuren
34					22	7	32	28	15	

Bijlage II Rapportage TU-Delft

Asbestos cement pipes

Final report for residual strength measurement and damage analysis

Authors

Xu Ma, Yading Xu, Arjan Thijssen

Delft University of Technology,
Faculty of Civil Engineering and Geosciences
Department 3MD
Section of Materials & Environment
Stevinweg 1
2628 CN Delft

e-mail: erik.schlangen@tudelft.nl
phone: +31 15 2786535

Authorisation: Prof.dr.ir. E. Schlangen



REPORT: ME-R20181205-KWR-ES
Date: 2019-01-15

Client

KWR Watercycle Research Institute.
Contact ir. R.H.S. (Ralph) Beuken
Groningenhaven 7
Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein

Asbestos cement pipes

Final report for residual strength measurement and damage analysis

1. Introduction

Water pipes made of asbestos cement are often used in the past. These pipes are approaching their end of service life. To be able to plan the gradual replacement of the pipes it is necessary to know the residual strength of the pipes. To get an indication of this residual strength it was decided to test a number of pipes taken from various locations. The samples are provided by KWR Watercycle Research Institute. The tests are performed in the lab of the Section Materials & Environment of the faculty of Civil Engineering and Geosciences at Delft University. This report described the test method and reports the results of the tests.

2. Description of the tests performed.

KWR provided 28 different pipes to tested with the code and dimensions as shown in table 3.1. Actually some more pipes were delivered, but they were already damaged on arrival and are not included in the study. It was decided to test the pipes by placing them in a container filled with water and increase the water pressure at the inside of the pipe, see figure 2.1. The pipes have all an inner diameter of 100 mm, an outer diameter between 120 and 145 mm and a length between 490 and 1170 mm as given in table 3.1

By testing the pipes in this way it is possible to avoid asbestos fibers being released into the air when the pipes crack. In addition, the whole test is carried out in specially constructed environment safe to work with asbestos containing material. The personal protection (such as the mask and disposable clothing) is also applied for the person who enters the isolated room.

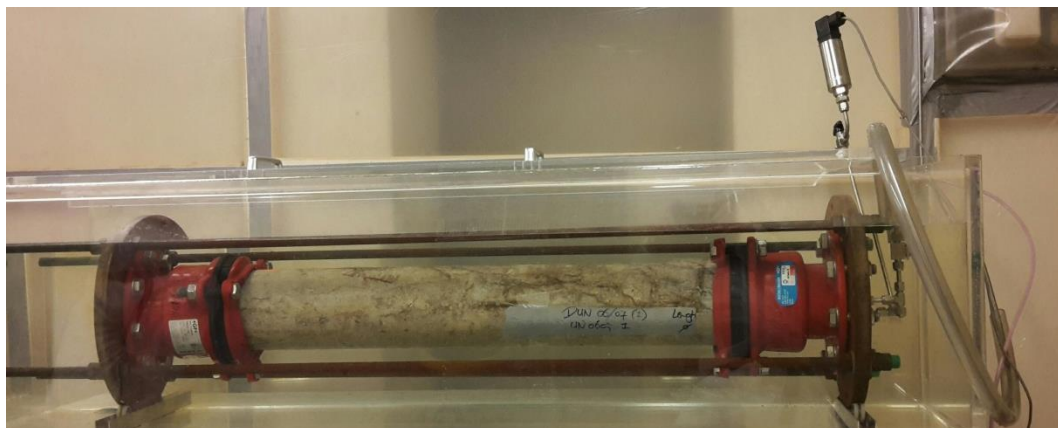
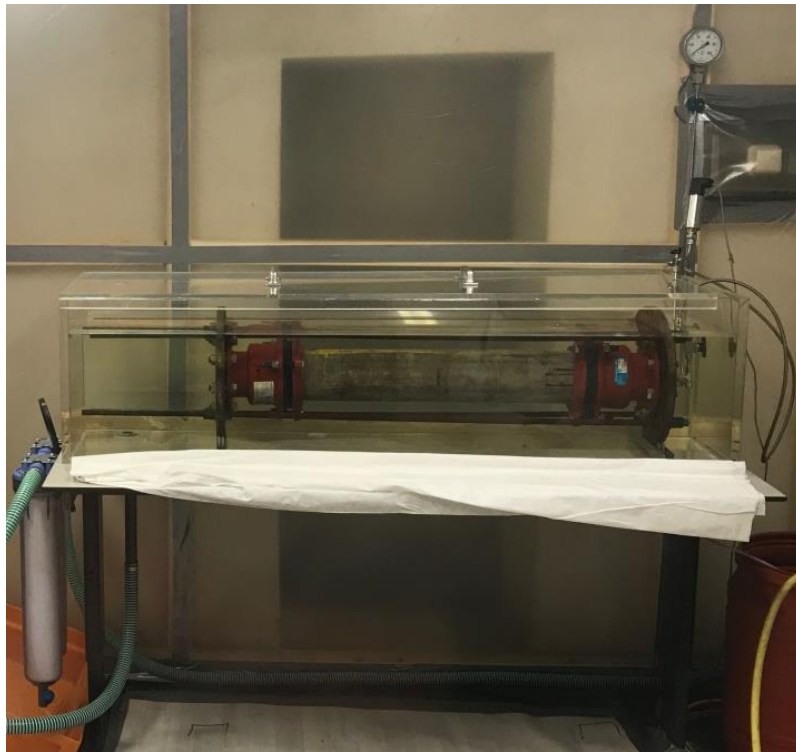


Figure 2.1: Setup of the test.

During the test, the pipe is filled with water and sealed at the two ends. One sealed end is connected with a high-pressure pump, which is also filled with water. When the test starts, the pump begins to compress the water from the pump into the tested pipe, which results in the increase of the internal pressure inside the tested pipe. The speed of the water flow from the pump controls the speed of the pressure increase inside the tested pipe. The internal pressure of the tested pipe is measured by a pressure sensor. All the related experimental data is recorded continuously by a Mp3 software connected to a computer.

All the tests in this report start with a constant speed of water flow of 25 mL / min. If leakage begins to occur in the connected joints, it can result in the stop of the internal pressure increase or even the decrease of the internal pressure. In this case, the speed of water flow is increased to 100 mL / min during the test, in order to try to still have an increase of water

pressure in the pipe.

Some pipes are damaged with a constant speed of water flow of 25 mL / min. Other pipes could only be damaged after increasing the speed of water flow to 100 mL / min. However, for some other tests, the pipes are not damaged even though the internal pressure is rather high. Increasing the flow speed and pressure further was not possible for some pipes, because the leakage at the joints was too much. The water inside the pipe was coloured in order to be able to observe leakage at the joints or through a crack.

In paragraph 3 of the report the results of the tests are reported. The summary of the results is given in table 3.1 and figures 3.1 and 3.2.

The peak pressure (in bar) in the pipes is given table 3.1.

The peak pressure (P) can be converted to tensile stress (σ_t) in the pipe using the following formula:

$$\sigma_t = D_i \times P / (2 \times T_w)$$

in which

σ_t = tensile stress in the pipe in MPa

D_i = the inner diameter of the pipe in mm

P = pressure in the pipe in MPa (1 bar = 0.1 MPa)

T_w = the wall thickness of the pipe in mm ((Outer diameter – 100)/2)

It should be noted that this is an approximation of the tensile stress. The stress will be influenced by variation of the thickness along the pipe length and diameter. Furthermore the fixation of the pipes at the end will lead to stress concentrations.

The pipes are also all scanned in the a CT scanner before tests are done. The CT-scan data are provided as an addition to this report. Also the pipes that were damaged during the tests are scanned again afterwards. From these data it could be possible to find a link between crack obtained and possible variation of cross section of the pipe. The resolution obtained in the CT-scans is 0.3 mm/pixel. The CT-scan data are not further analysed. Some images and photos of the tests are provided in the next paragraph.

3. Experimental results of the tested asbestos cement pipes

Table 3.1: Summary of the peak pressure during the tests.

Pipes were damaged during tests					
Test number	Pipe number	Length (mm)	Outer diameter (mm)	Peak pressure (Bar)	Peak tensile stress (MPa)
1	168218	1040	130	50	16.7
2	177598	1140	130	30	10.0
3	0026-1	1010	130	32	10.7
4	D10365-1	950	130	24	8.0
5	D10915-1	1160	130	45	15.0
6	D161290	980	130	45	15.0
7	DUN04	1100	130	29	9.7
8	ONB03	890	120	45	22.5
9	P10427-01	890	130	42	14.0
10	P10915	1070	120	45	22.5
11	177340	830	130	33	11.0
12	IC17055-1	810	150	38	7.6
13	D09586-1	1170	130	25	8.3
14	103679	890	130	49	16.3
15	D09930	870	130	42	14.0
Pipes were not damaged during tests					
Test number	Pipe number	Length (mm)	Outer diameter (mm)	Peak pressure (Bar)	
16	DUN003	970	135	53	15.1
17	DUN05	1060	135	42	12.0
18	176851	940	130	45	15.0
19	DUN 06/07 (1)	840	135	48	13.7
20	DUN001	1000	145	42	9.3
21	WMT01	760	130	45	15.0
22	DUN002	990	140	59	14.8
23	DUN 06/07 (2)	940	135	47	13.4
24	D9691-1	940	120	53	26.5
25	maasbreessestr (1)	700	120	53	26.5
26	maasbreessestr (2)	490	135	59	16.9
27	maasbreessestr (3)	610	130	52	17.3
28	maasbreessestr (4)	560	130	54	18.0

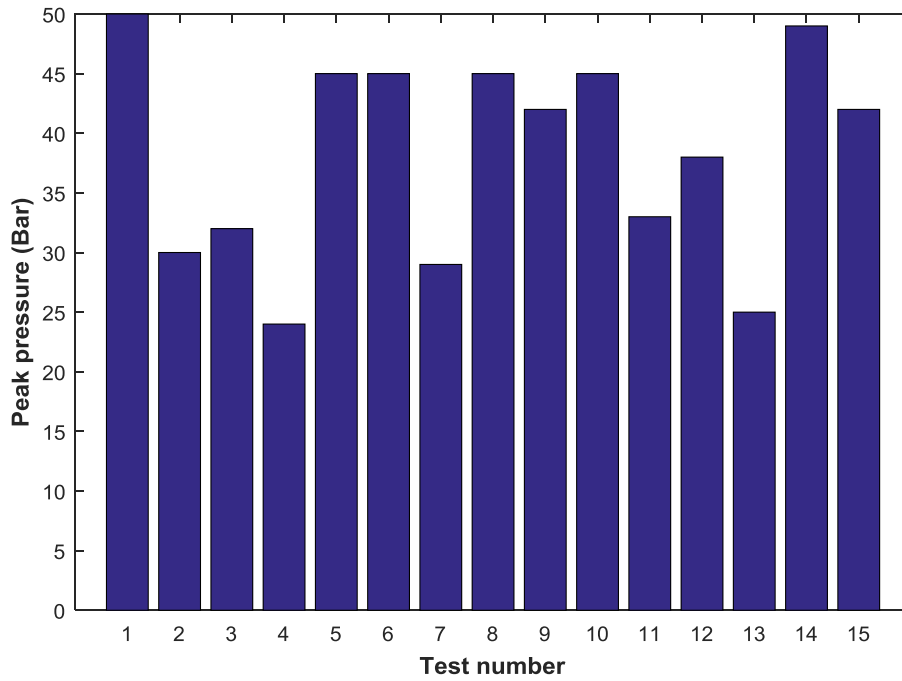


Figure 3.1: Summary of the residual strength of the pipes which were damaged during tests.

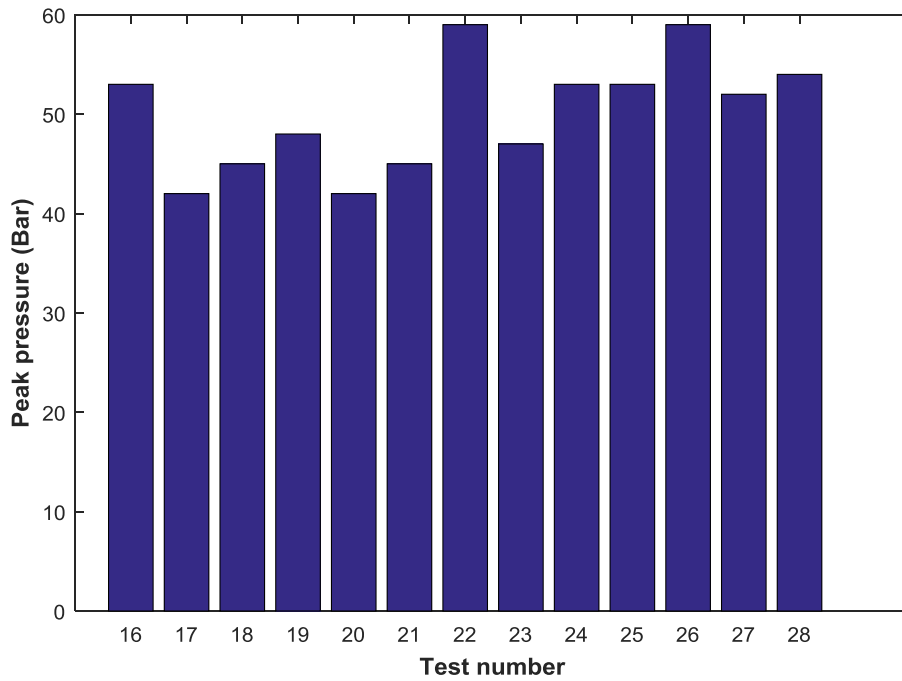


Figure 3.2: Summary of the peak pressure of the pipes which were not damaged during tests.

3.1. Experimental results of pipes which were damaged during tests

3.1.1. Test number 1

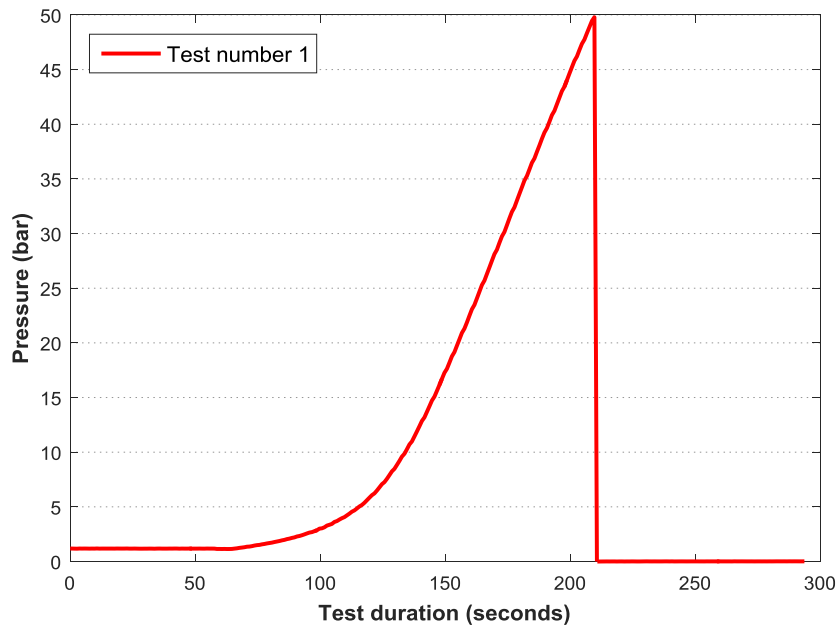


Figure 3.1.1.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number 168218.





Figure 3.1.1.2: The cracked pipe.

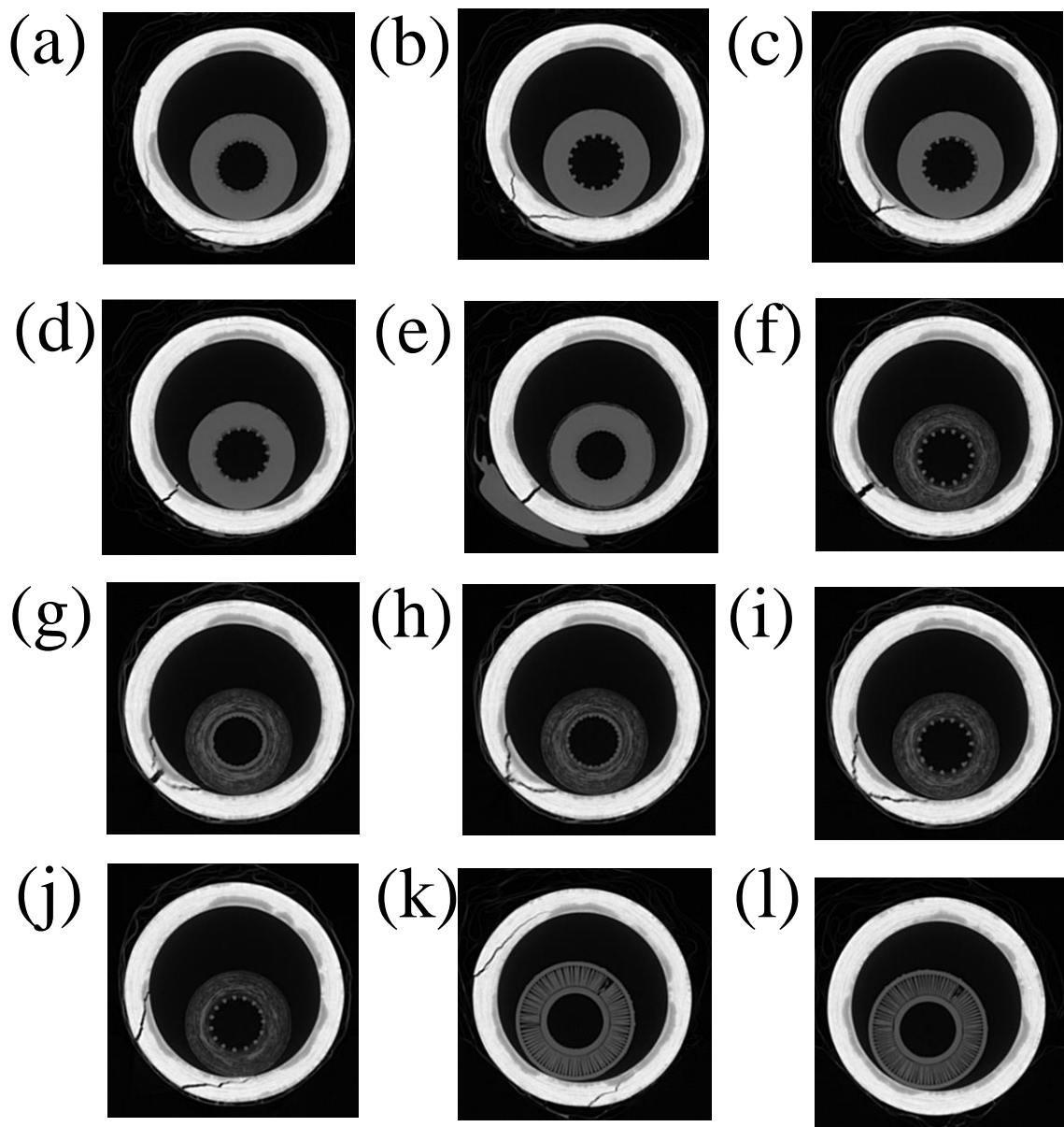


Figure 3.1.1.3: Reconstructed microtomography slices of the cracked pipe with number 168218

((a)-(l): from left to right in Figure 2.1.1.2)

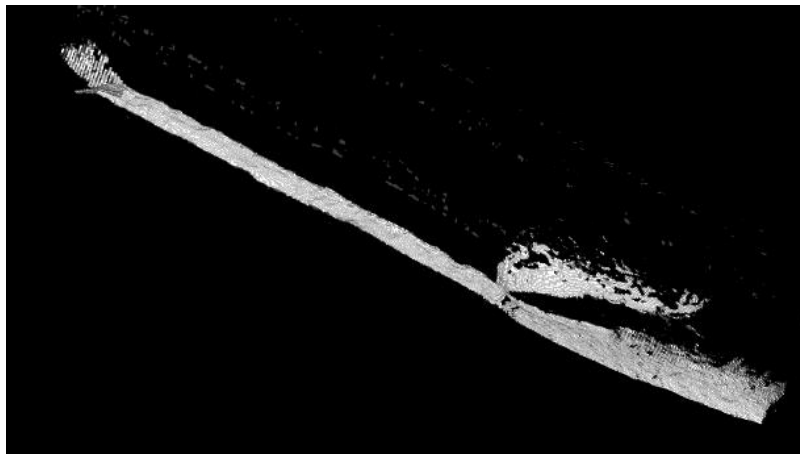
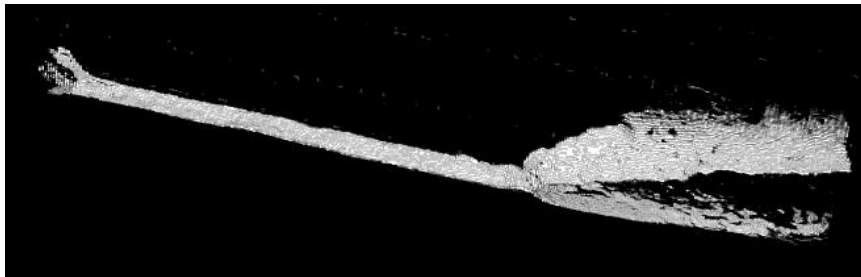
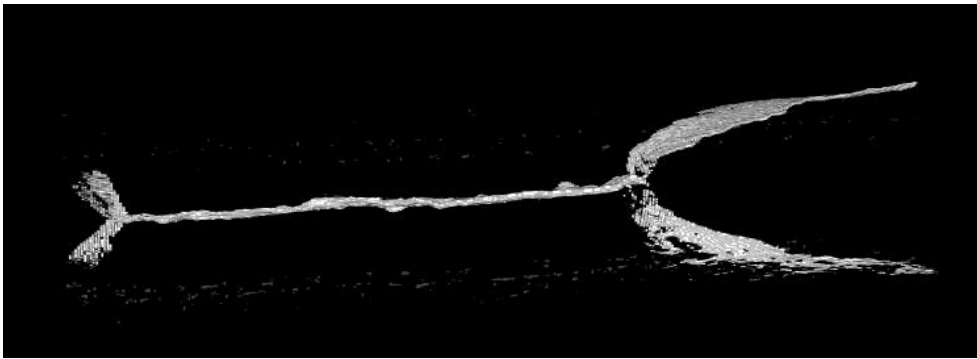


Figure 3.1.1.4: 3D crack pattern of the cracked pipe with number 168218

3.1.2. Test number 2

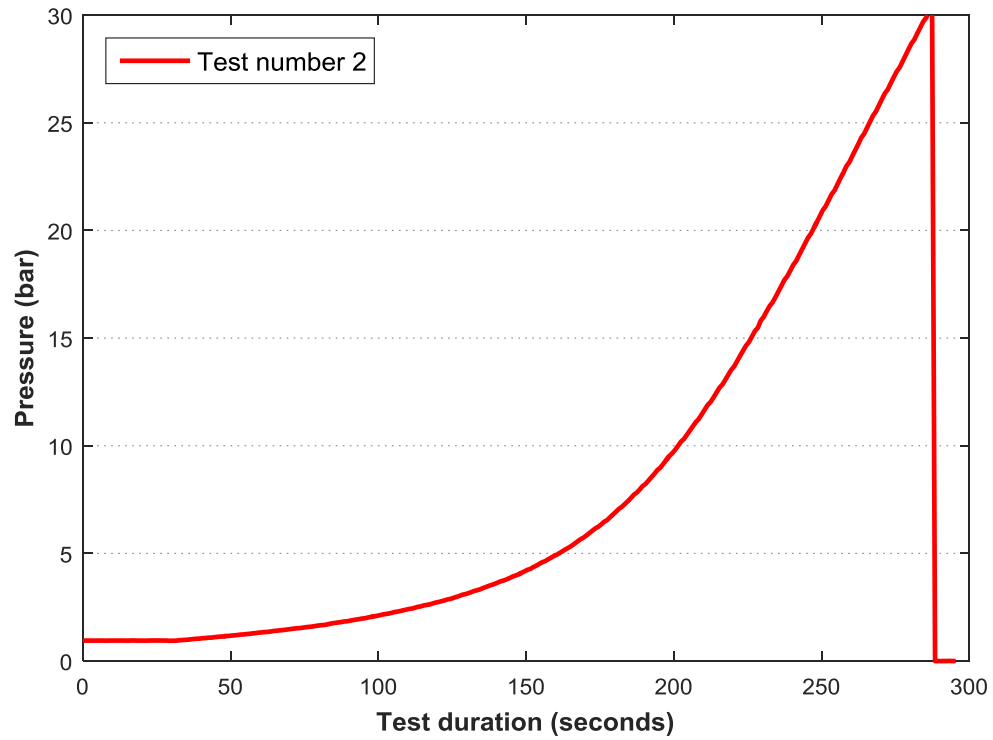


Figure 3.1.2.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number 177598.





Figure 3.1.2.2: The cracked pipe.

3.1.3. Test number 3

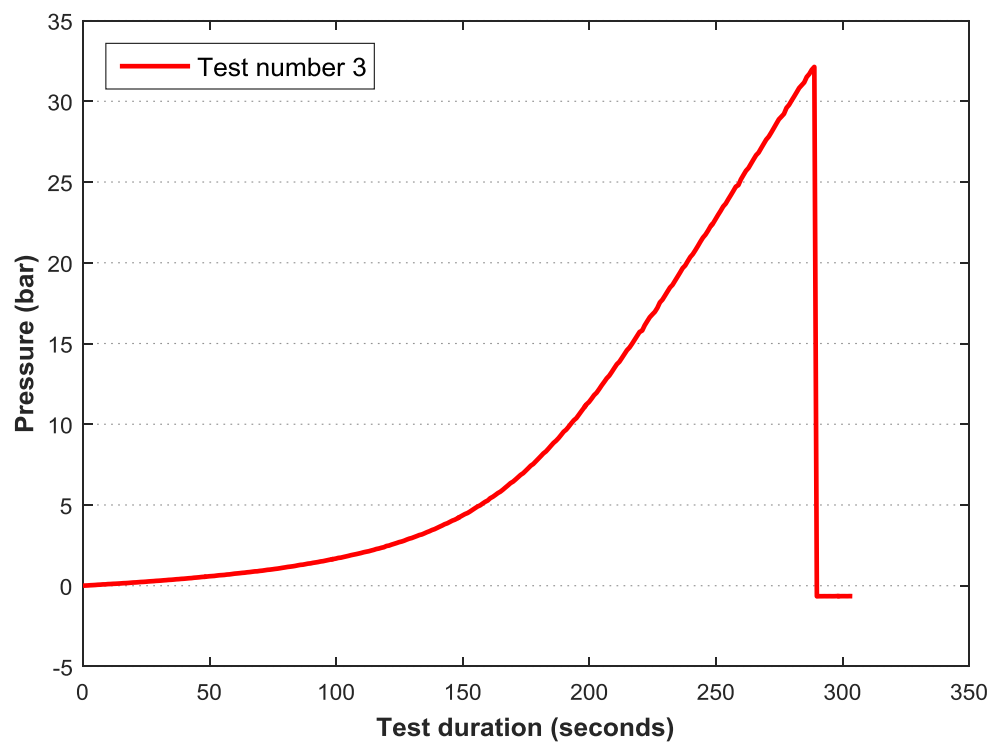


Figure 3.1.3.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number 0026-1.



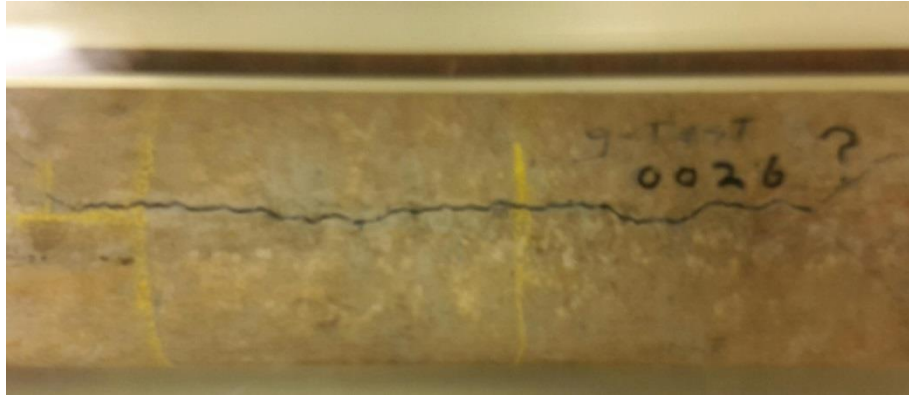


Figure 3.1.3.2: The cracked pipe.

3.1.4. Test number 4

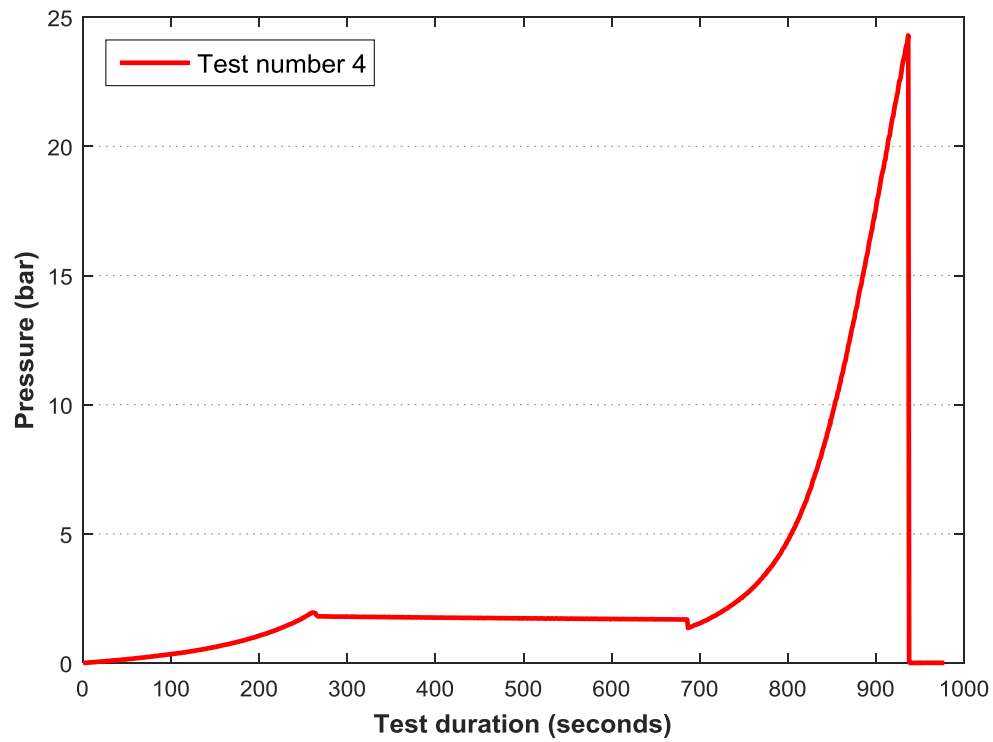


Figure 3.1.4.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number D10365-1.





Figure 3.1.4.2: The cracked pipe.

3.1.5. Test number 5

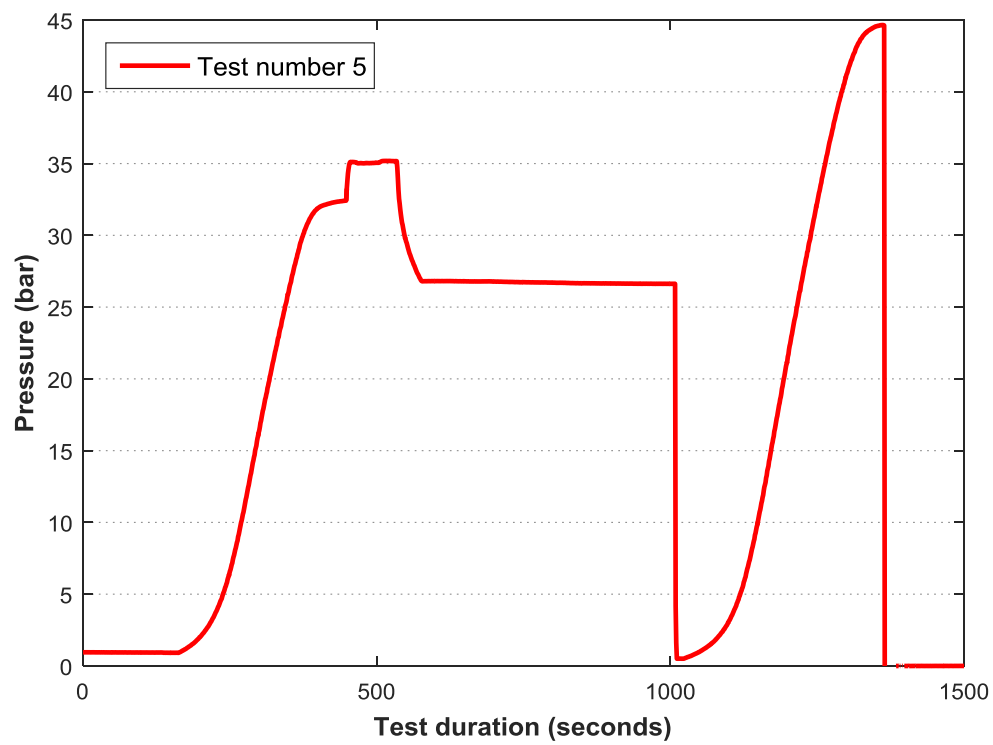


Figure 3.1.5.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number D10915-1.

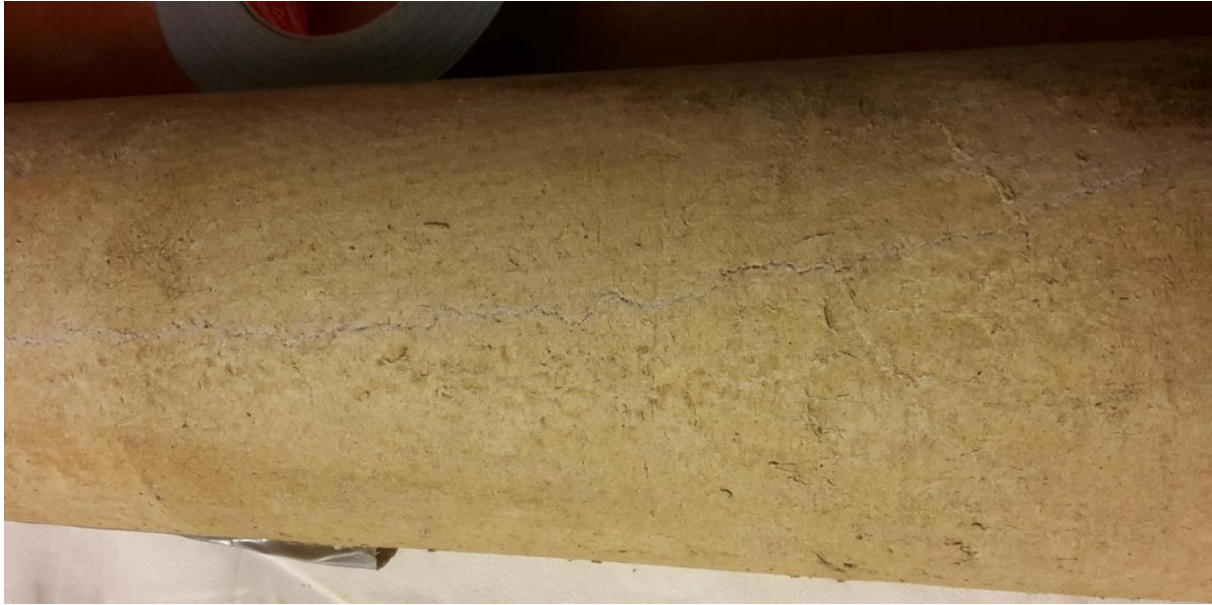


Figure 3.1.5.2: The cracked pipe.

3.1.6. Test number 6

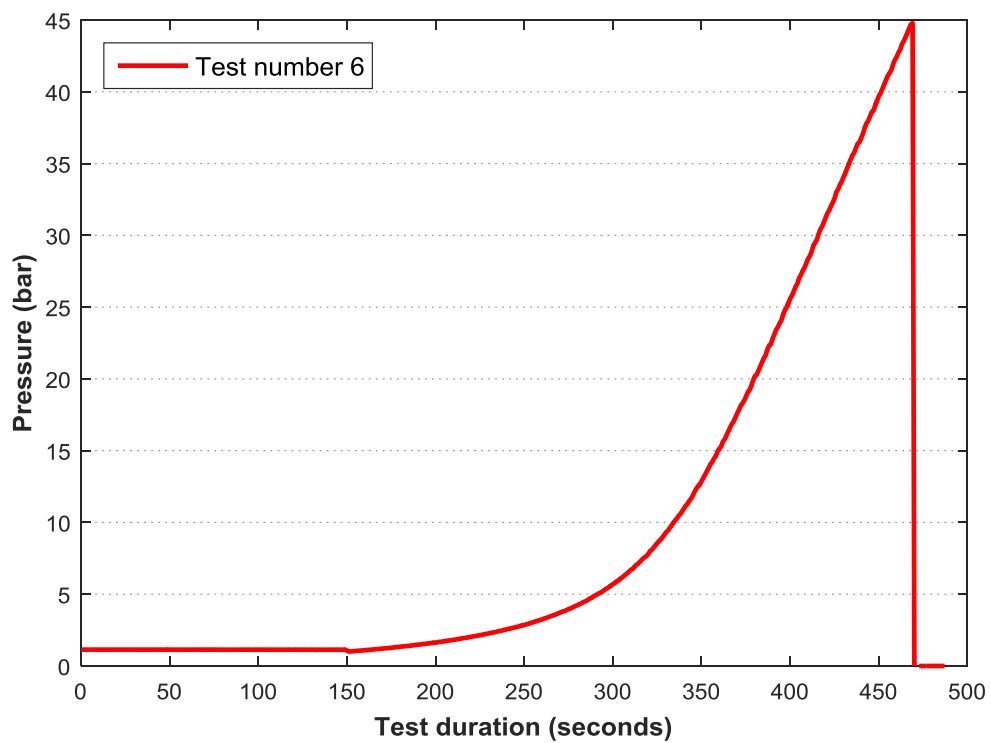


Figure 3.1.6.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number D161290.

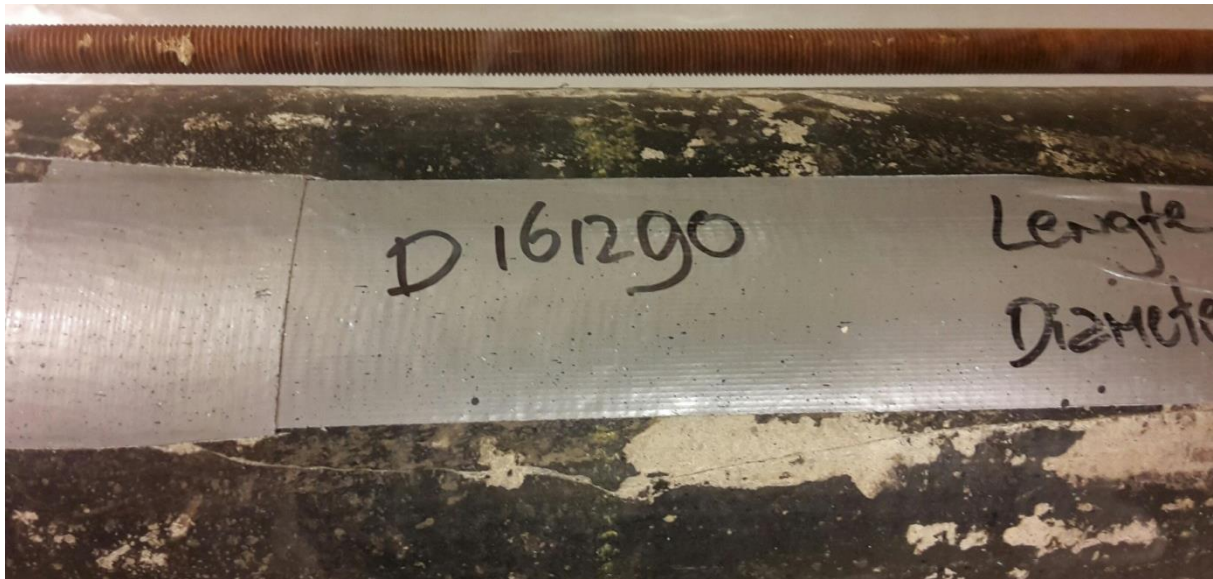


Figure 3.1.6.2: The cracked pipe.

3.1.7. Test number 7

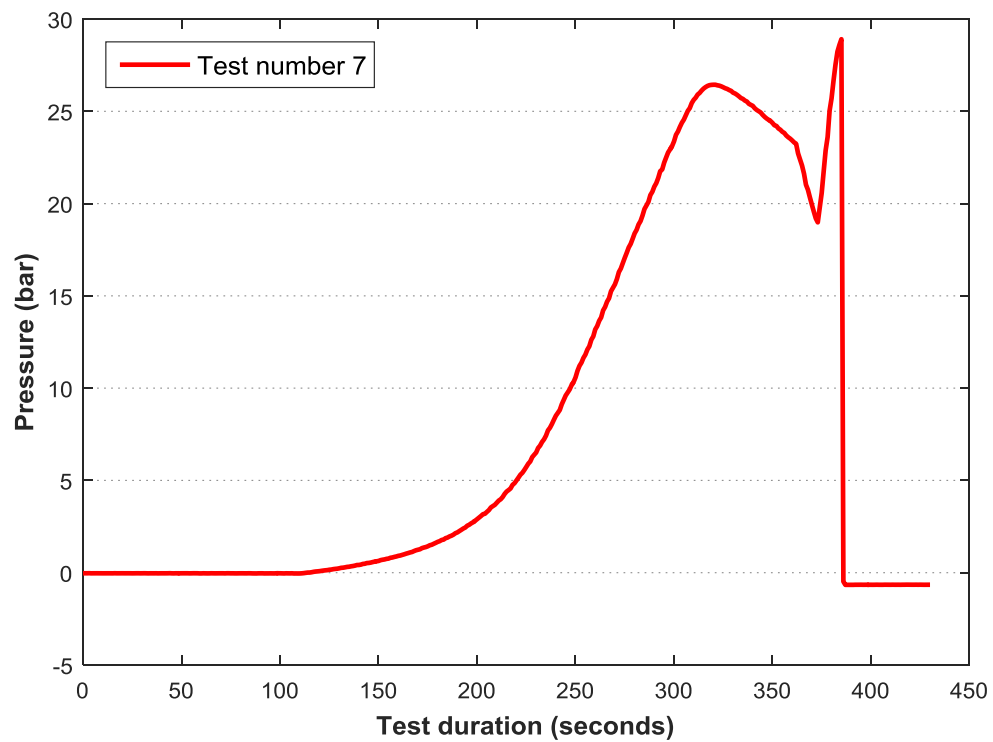


Figure 3.1.7.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number DUN04.

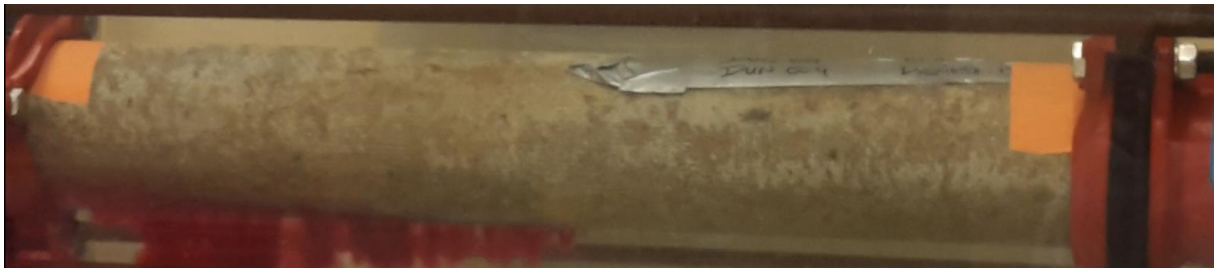


Figure 3.1.7.2: The cracked pipe.

3.1.8. Test number 8

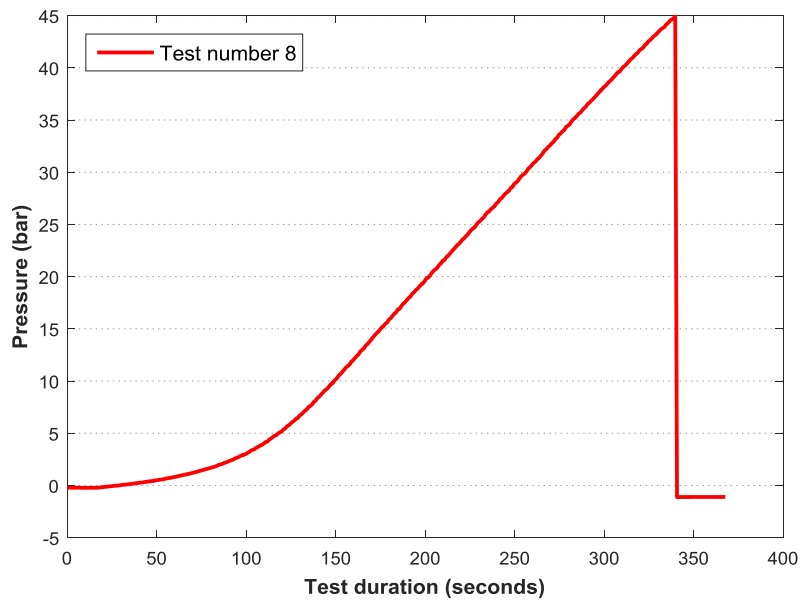


Figure 3.1.8.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number ONB03.

3.1.9. Test number 9

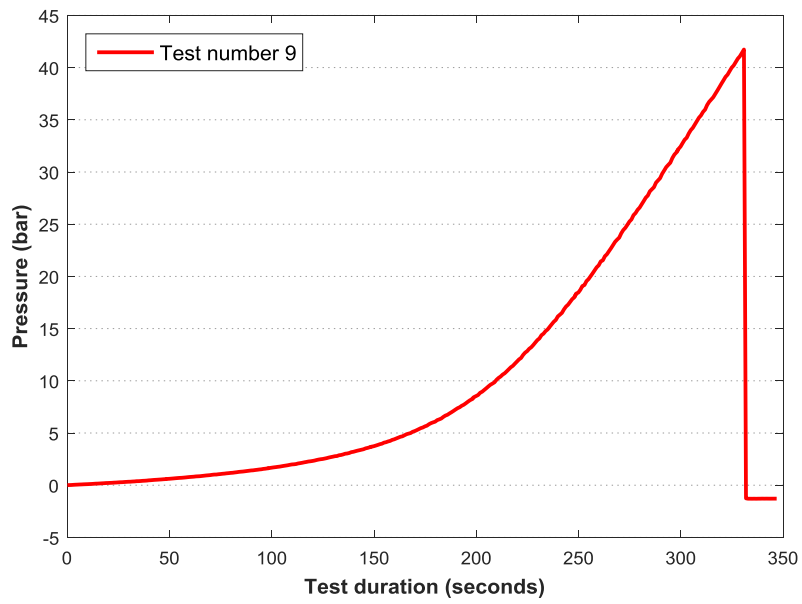


Figure 3.1.9.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number P10427-01.



Figure 3.1.9.2: The cracked pipe.

3.1.10. Test number 10

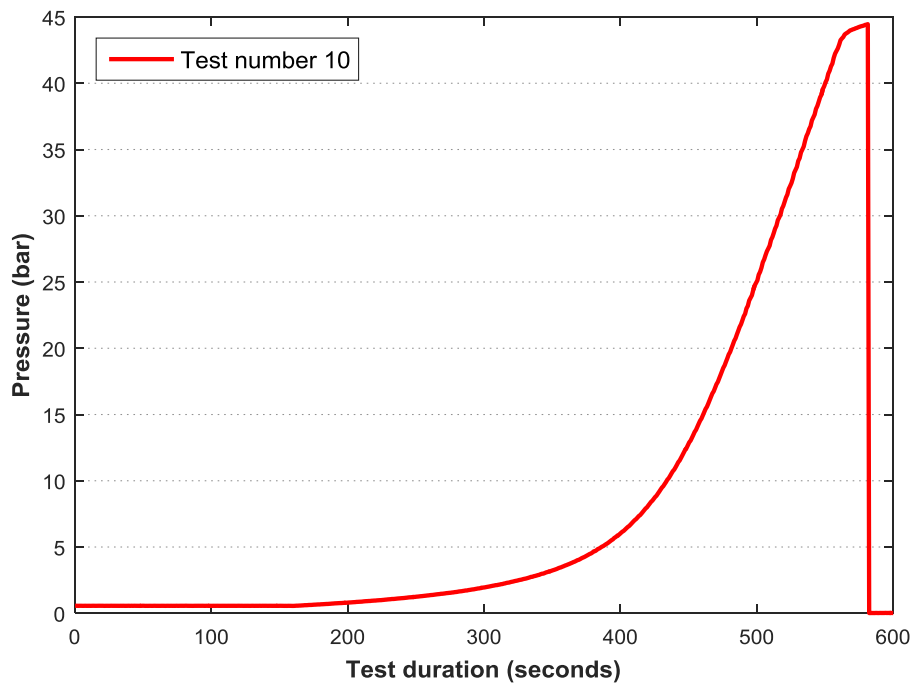


Figure 3.1.10.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number P10915.

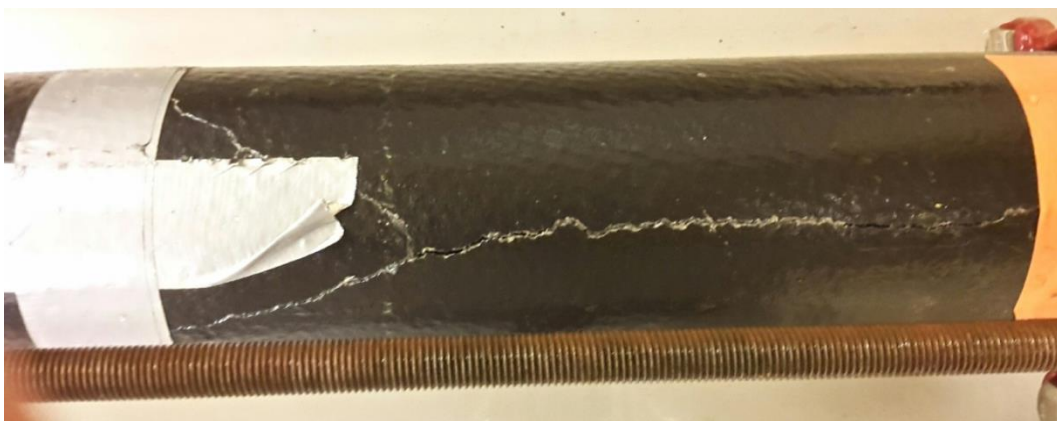


Figure 3.1.10.2: The cracked pipe.

3.1.11. Test number 11

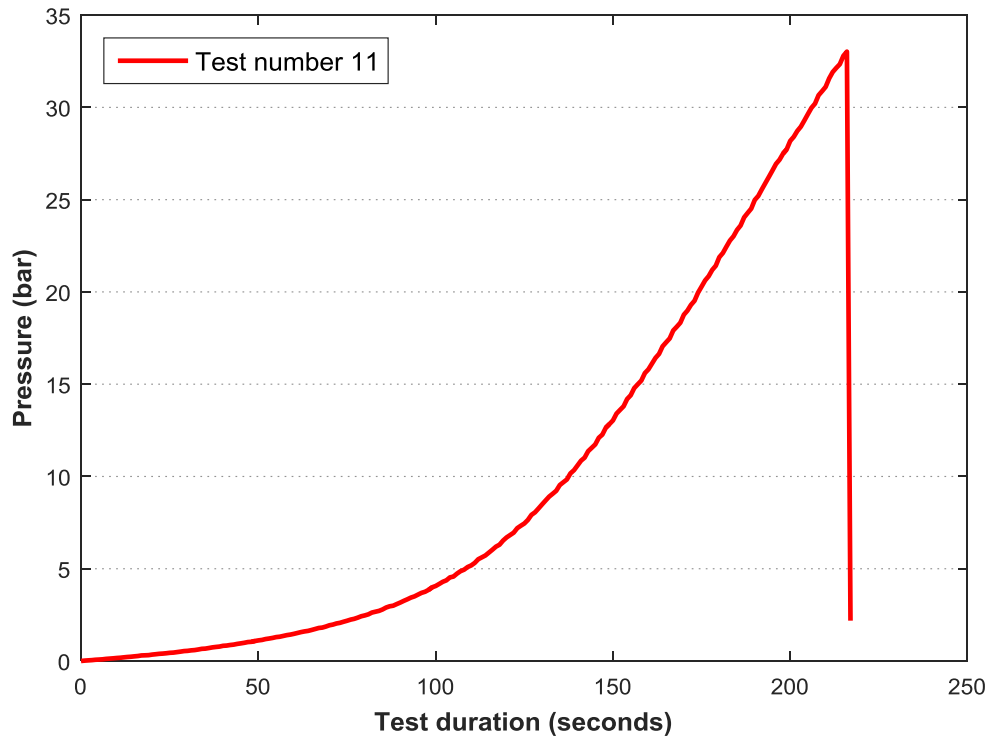


Figure 3.1.11.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number 177340.



Figure 3.1.11.2: The cracked pipe.

3.1.12. Test number 12

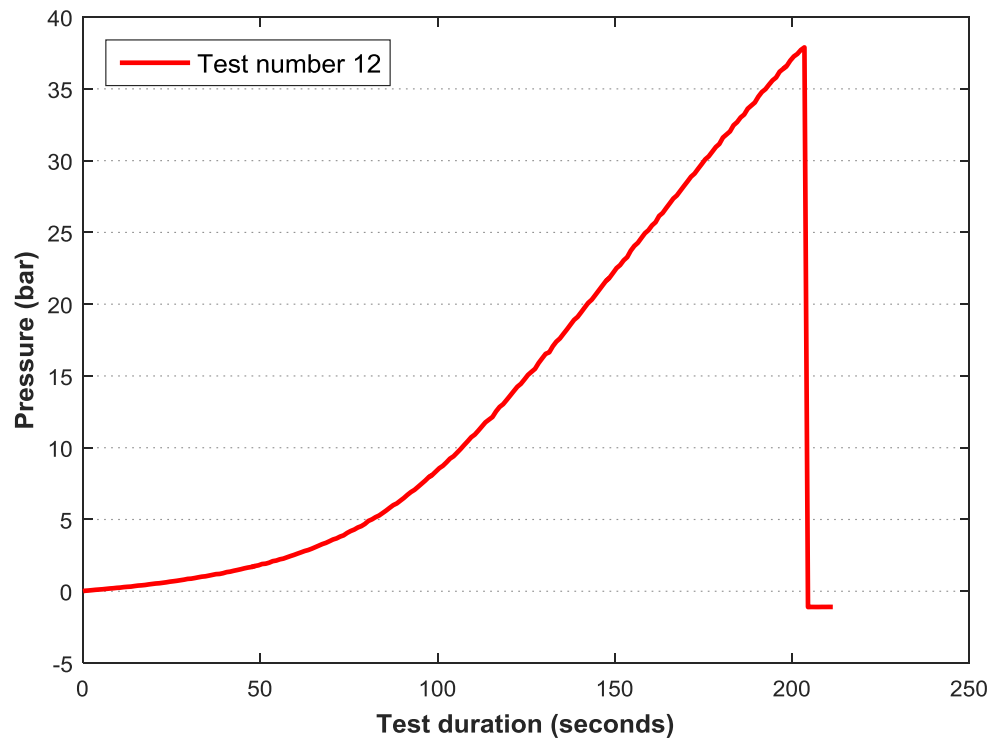


Figure 3.1.12.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number IC17055-1.

3.1.13. Test number 13

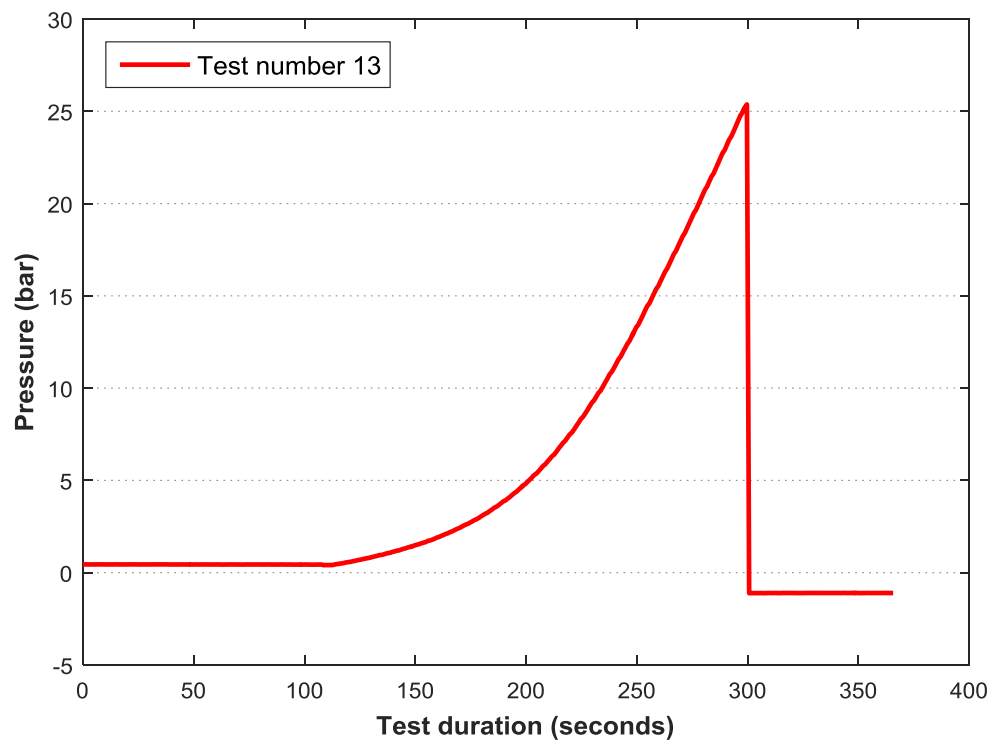


Figure 3.1.13.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number D09586-1.

3.1.14. Test number 14

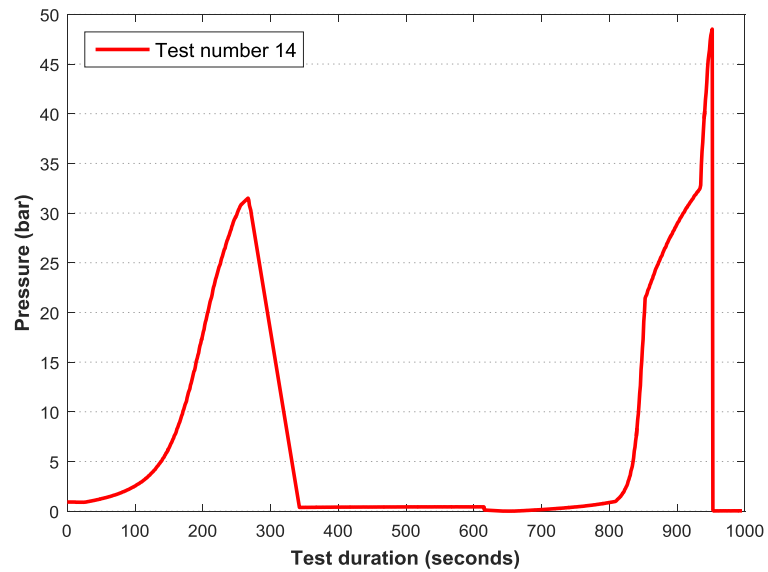


Figure 3.1.14.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number 103679.

3.1.15. Test number 15

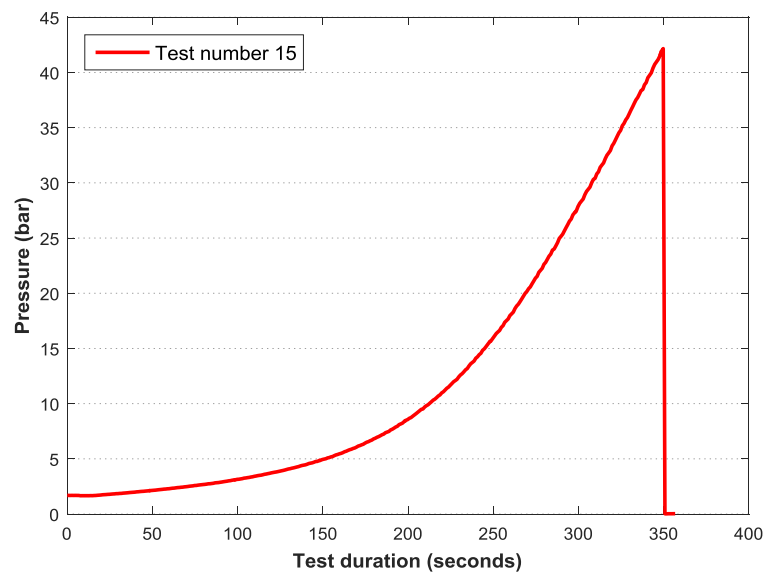


Figure 3.1.15.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number D09930.



Figure 3.1.15.2: The cracked pipe.

3.2. Experimental results of pipes which were not damaged during tests

3.2.1. Test number 16

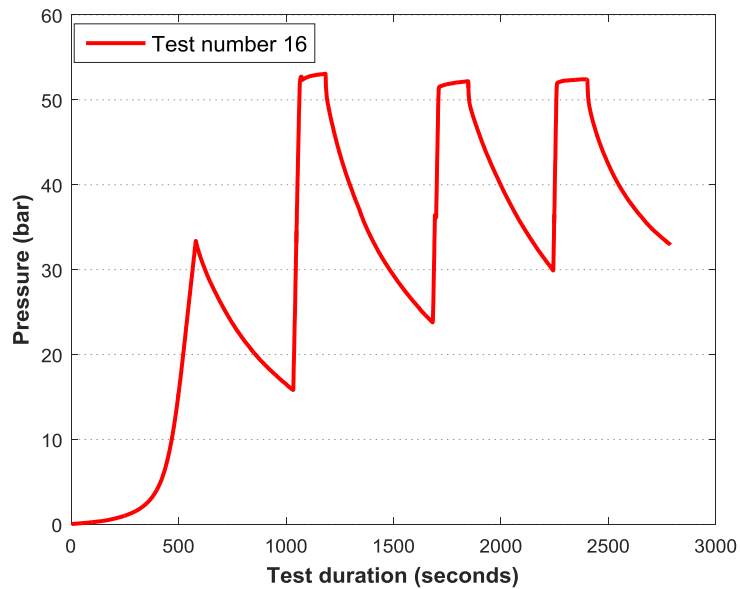
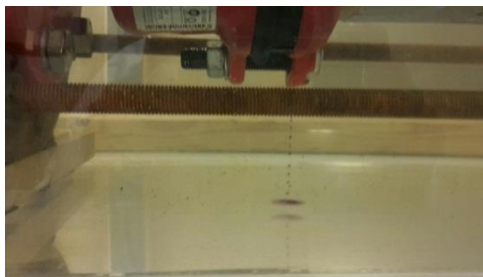


Figure 3.2.1.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number DUN003.



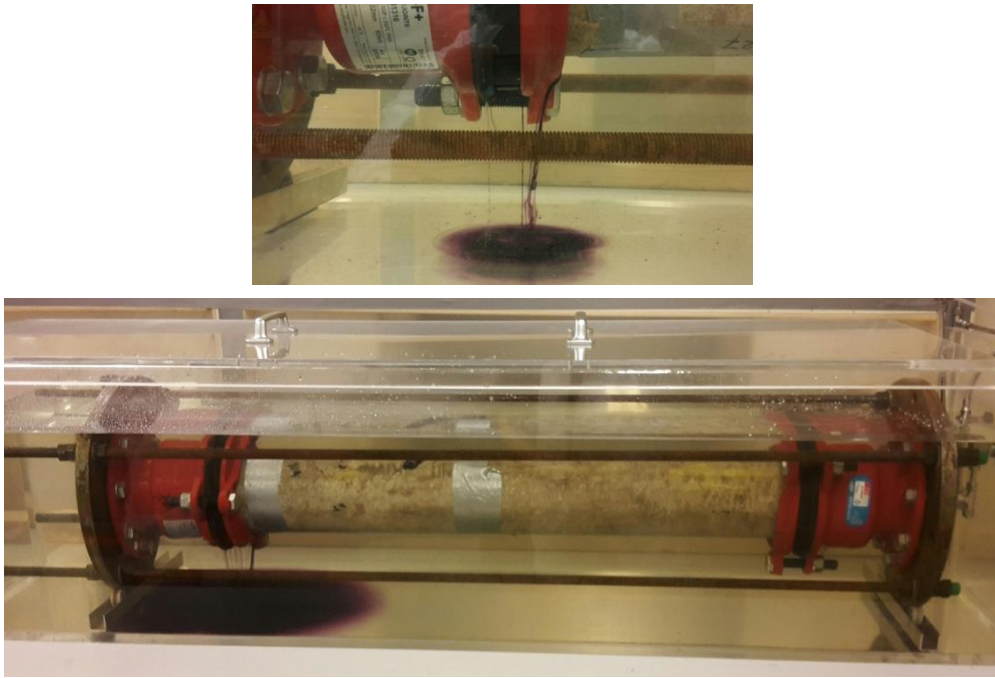


Figure 3.2.1.2: The leaching of the connected joint.

3.2.2. Test number 17

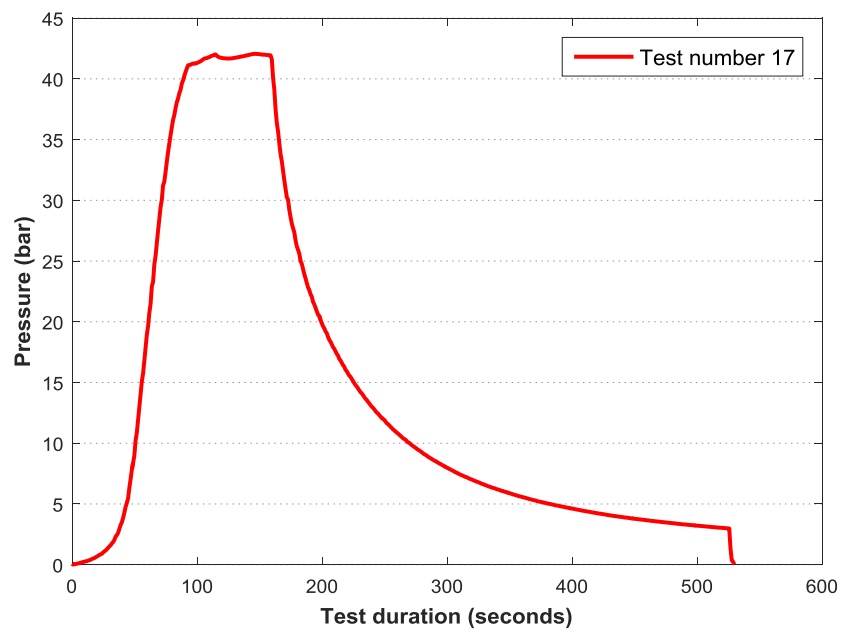


Figure 3.2.2.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number DUN05.

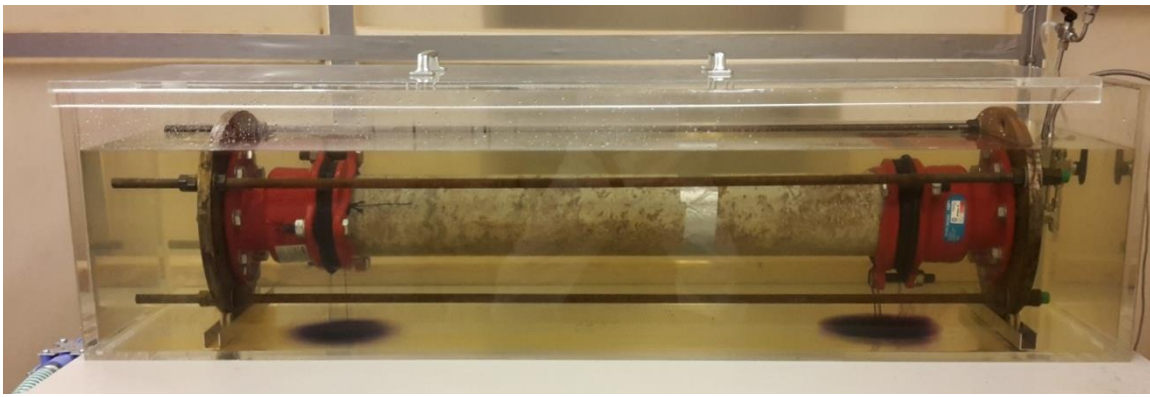
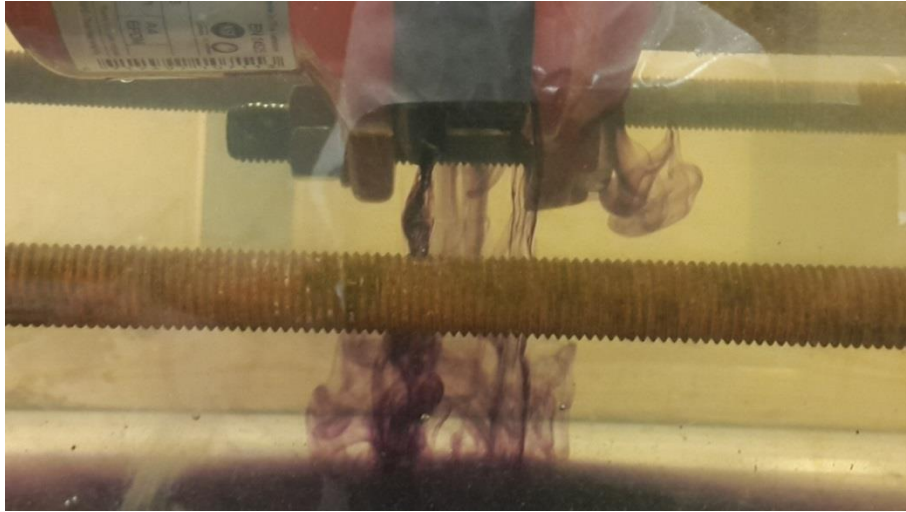


Figure 3.2.2.2: The leaching of the connected joint.

3.2.3. Test number 18

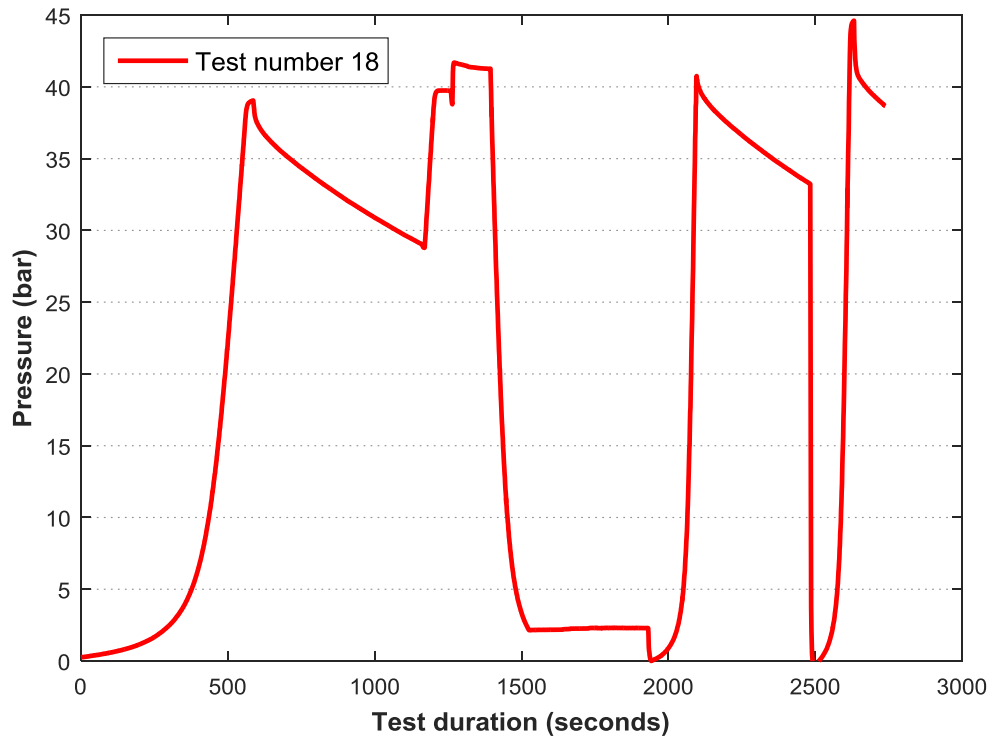


Figure 3.2.3.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number 176851.

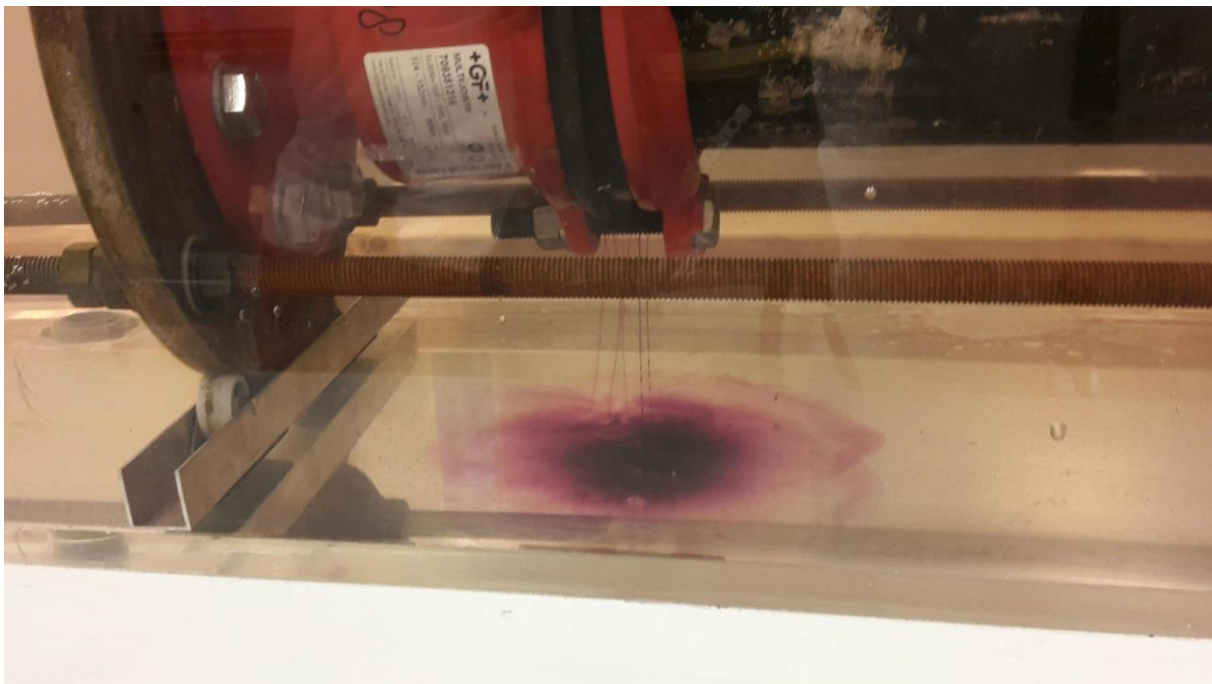


Figure 3.2.3.2: The leaching of the connected joint.

3.2.4. Test number 19

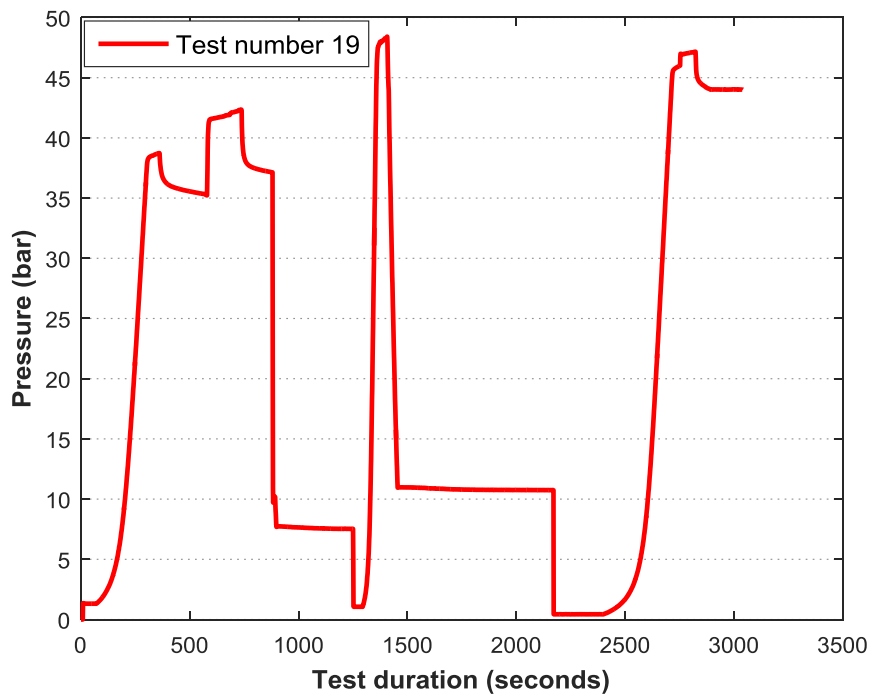


Figure 3.2.4.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number DUN 06/07 (1).



Figure 3.2.4.2: The leaching of the connected joint.

3.2.5. Test number 20

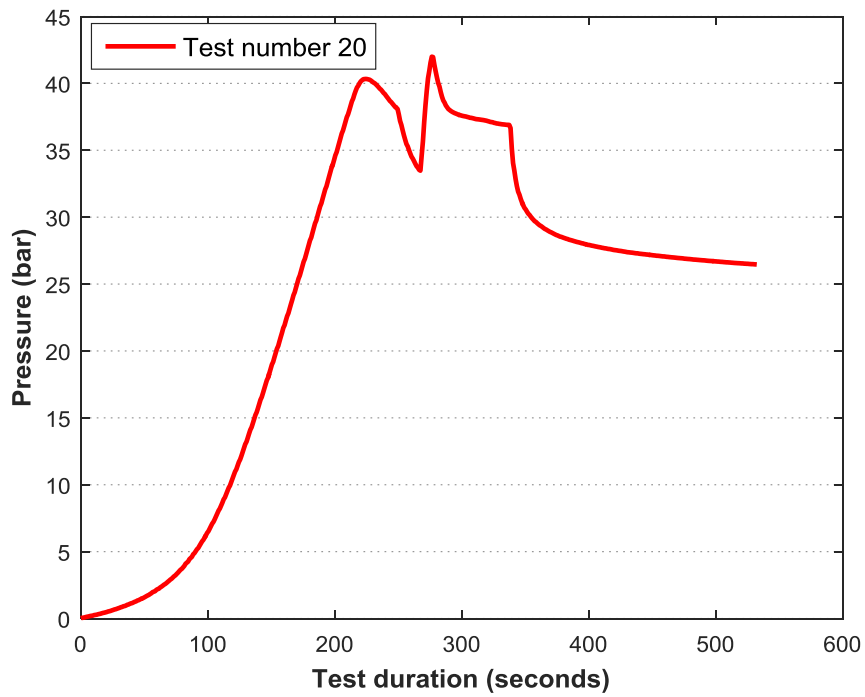


Figure 3.2.5.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number DUN001.

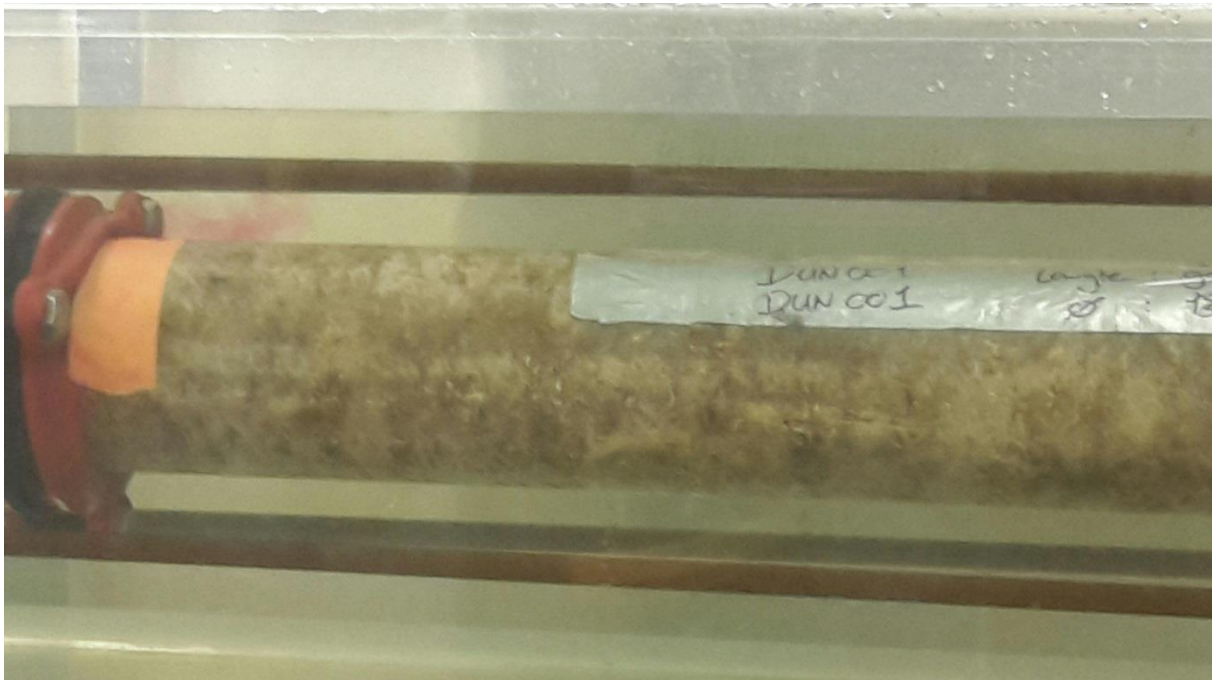


Figure 3.2.5.2: The leaching of the connected joint.

3.2.6. Test number 21

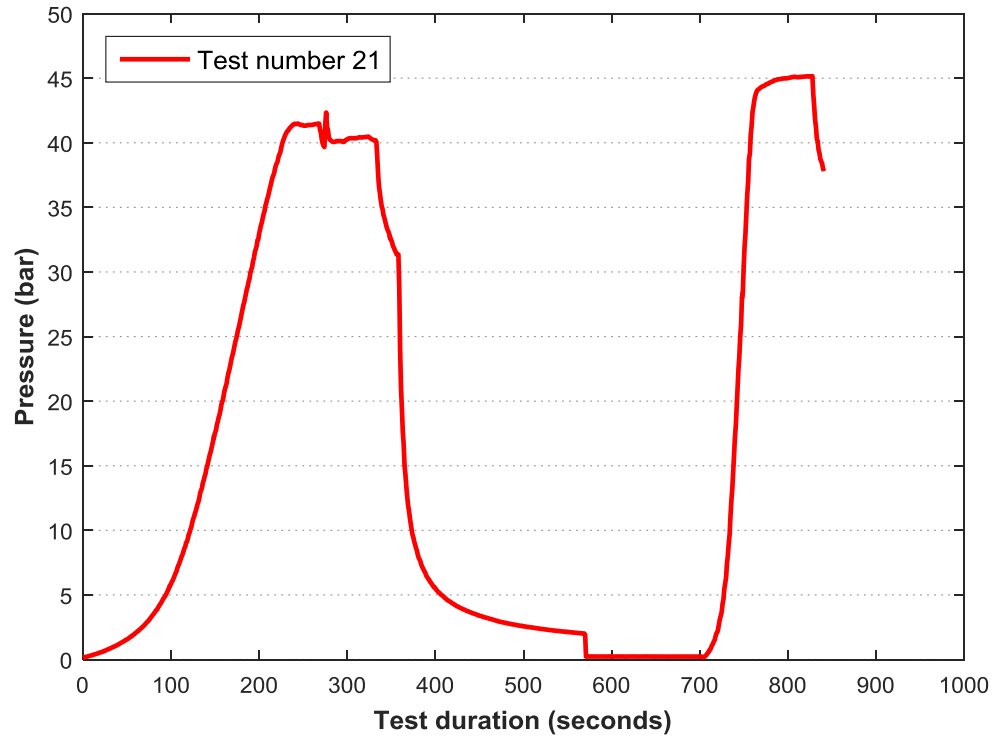


Figure 3.2.6.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number WMT01.

3.2.7. Test number 22

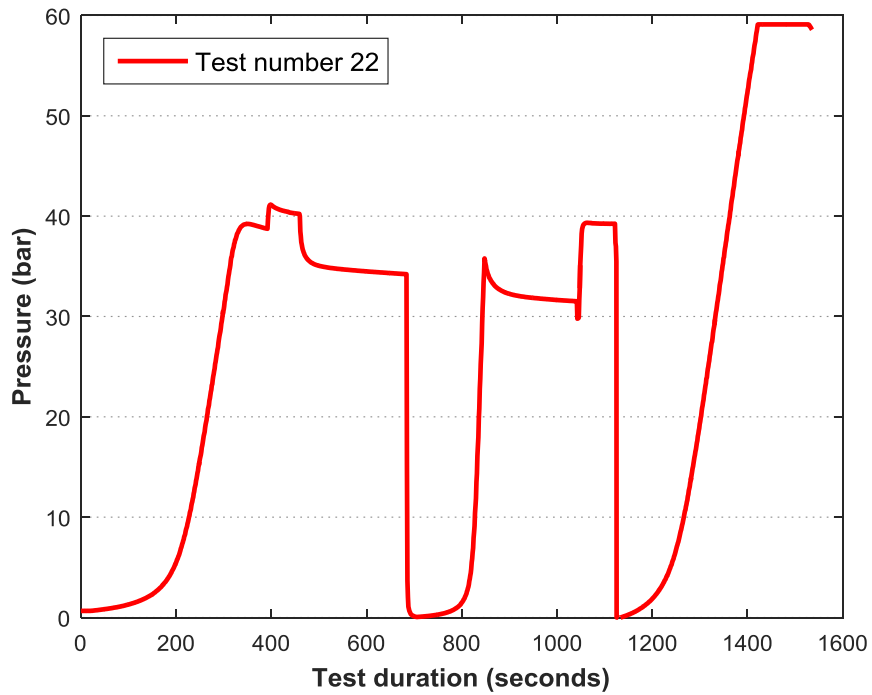


Figure 3.2.7.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number DUN002.



Figure 3.2.7.2: The leaching of the connected joint.

3.2.8. Test number 23

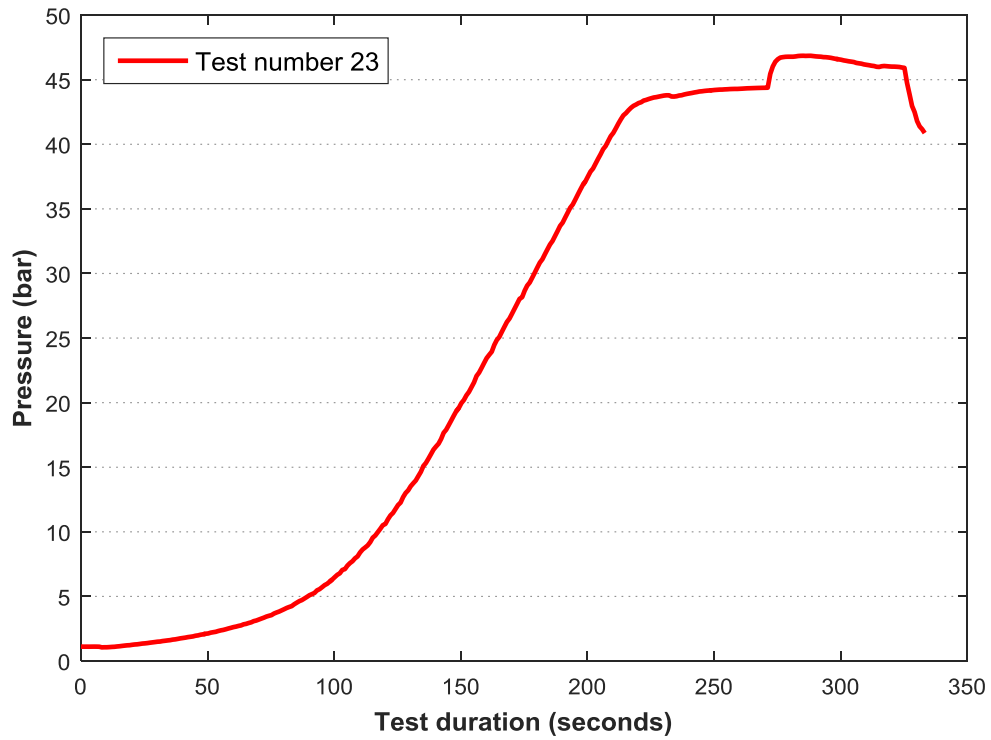


Figure 3.2.8.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number DUN 06/07 (2).

3.2.9. Test number 24

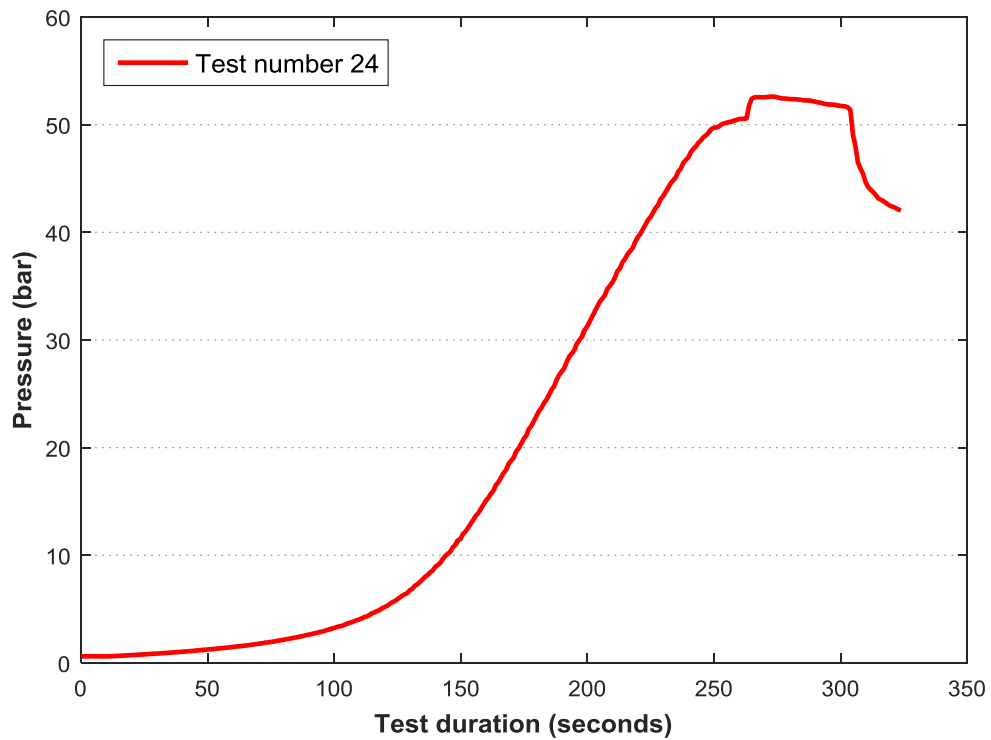


Figure 3.2.9.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number D9691-1.

3.2.10. Test number 25

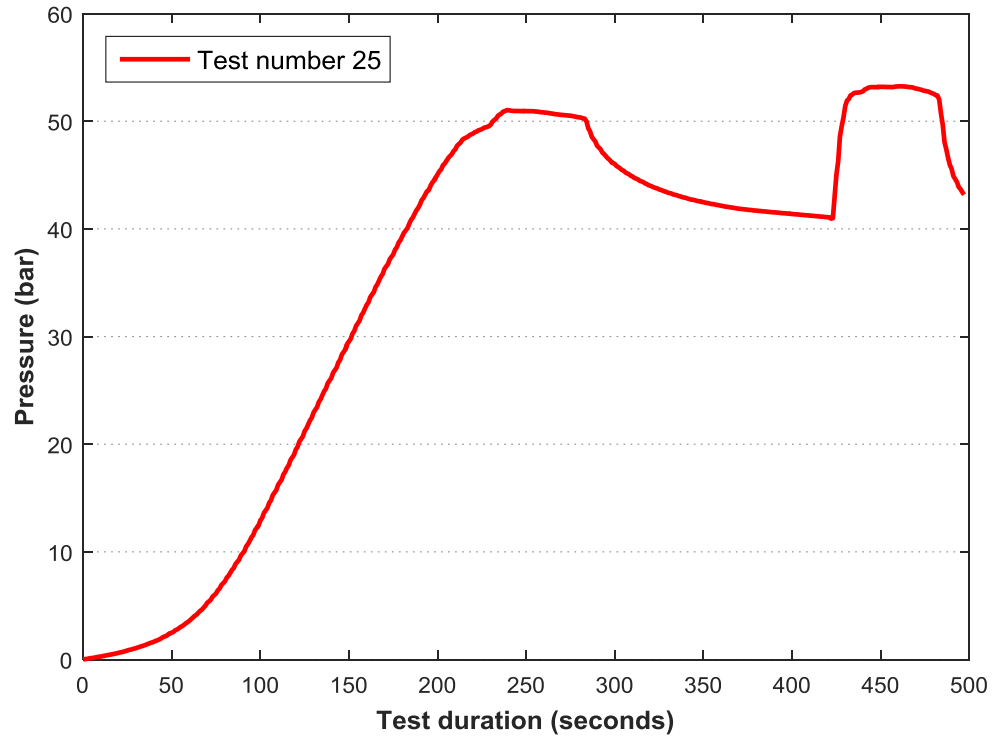


Figure 3.2.10.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number maasbreessestr (1).

3.2.11. Test number 26

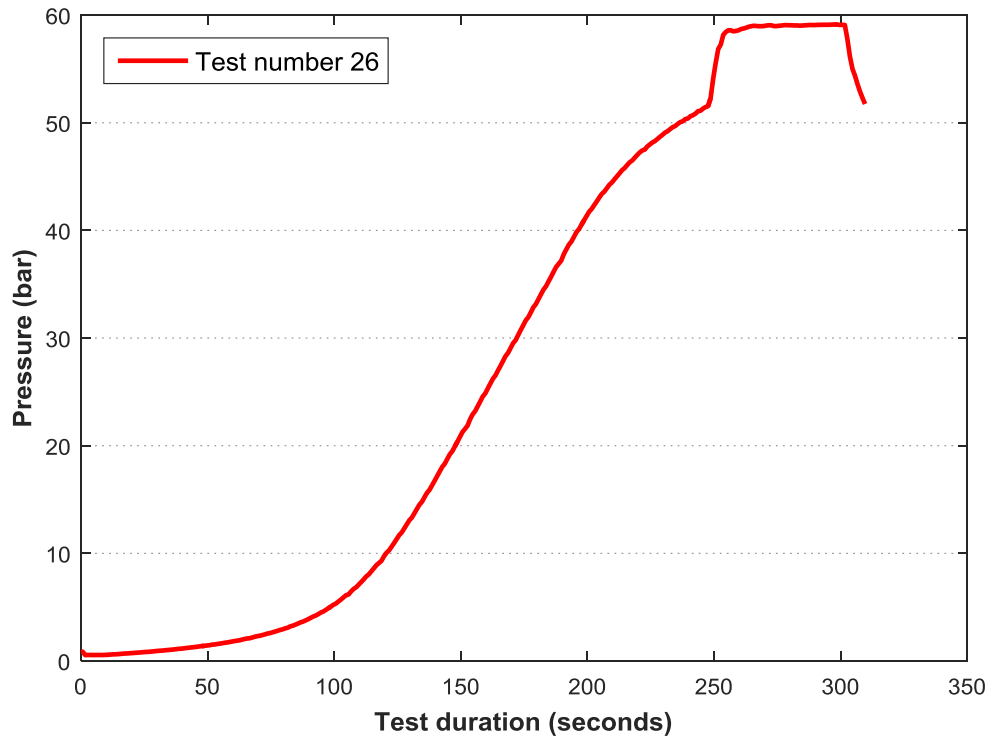


Figure 3.2.11.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number maasbreessestr (2).

3.2.12. Test number 27

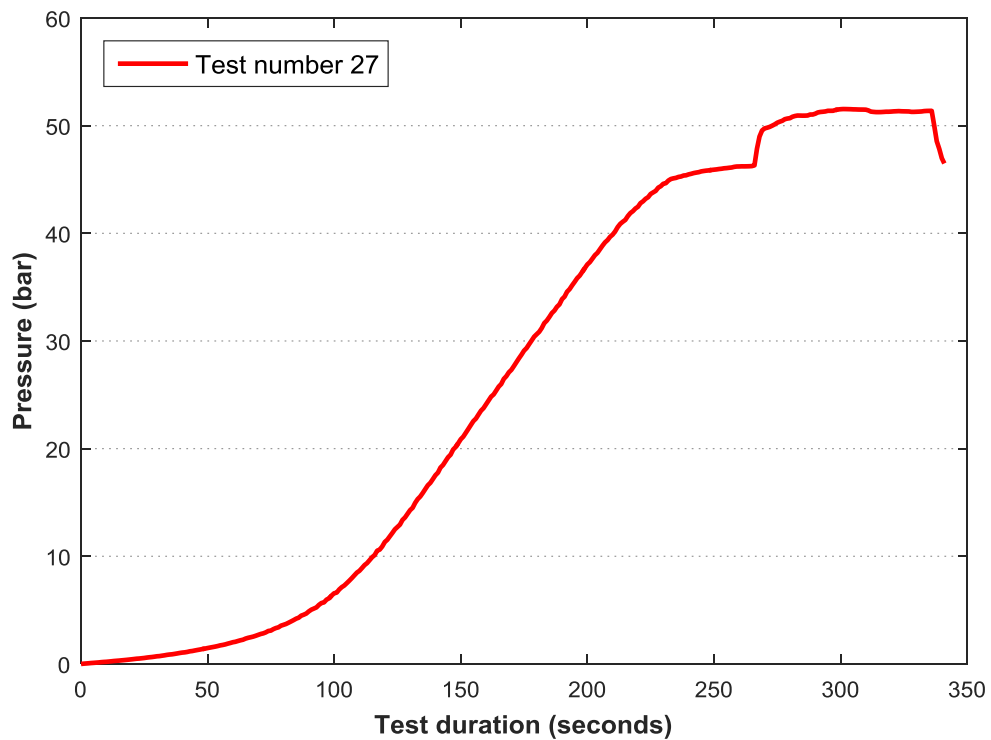


Figure 3.2.12.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number maasbreessestr (3).

3.2.13. Test number 28

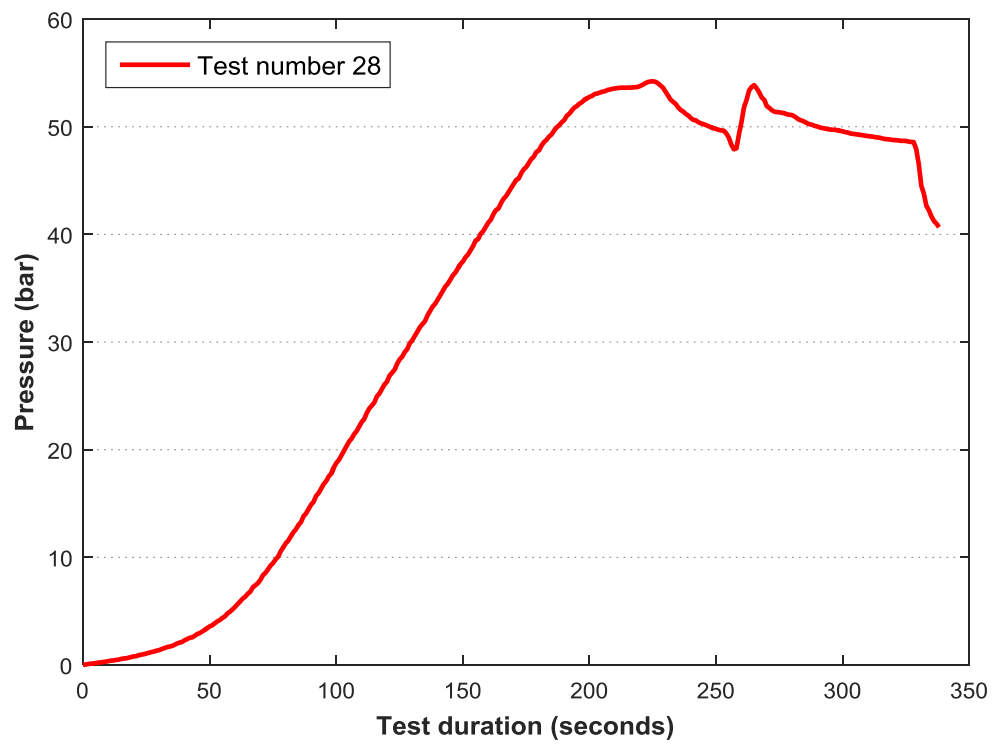


Figure 3.2.13.1: Pressure – test duration curve of the tested pipe with number maasbreesestr (4).