



BTO 2018.009 | januari 2018

BTO rapport

Kennisregels PVC leidingen

Update 2017

BTO

Kennisregels PVC leidingen, update 2017

BTO 2018.009 | januari 2018

Opdrachtnummer

400554-160

Projectmanager

Drs. P.G.G. (Nellie) Slaats

Opdrachtgever

BTO- Thematisch onderzoek - Assetmanagement

Kwaliteitsborger(s)

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

Auteur(s)

Ing. G.A.M. (George) Mesman.

Dr.ir. K.A. (Karel) van Laarhoven

Verzonden aan

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en is openbaar.

Jaar van publicatie
2018

Meer informatie

T 0306069571
E george.mesman@kwrwater.nl

Keywords

PVC, veroudering, kennisregels, leidingen

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



BTO 2018.009 | januari 2018 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

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

Voorwoord

In 2015 is het rapport BTO 2015.054 "Kennisregels PVC leidingen" uitgebracht. In navolging hierop is het project "Toestandsbepaling PVC" uitgevoerd waarvan voorliggend rapport het resultaat is. Gedurende het onderzoek dat is uitgevoerd in de periode 2015 – 2017 is naar voren gekomen dat de bij de uitwerking van de proeven voor de bepaling van de weerstand tegen langzame scheurgroei voor een aantal resultaten een herberekening noodzakelijk was. De aanleiding hiervoor was een door TNO geconstateerde noodzakelijke aanpassing van de rekenmethode die ter grondslag ligt aan de berekening van de weerstand tegen langzame scheurgroei. Om die reden zijn de gerapporteerde resultaten uit het rapport BTO 2015.-054 aangepast. Tevens zijn de resultaten toegevoegd van de proeven die sinds 2015 zijn uitgevoerd. De conclusies van het onderzoek zoals verwoord in BTO 2015.054 zijn niet gewijzigd op basis van de herberekeningen en actualisatie. Wel zijn waar dit relevant was de gewijzigde resultaten van individuele tests voorgelegd aan de betrokken waterleidingbedrijven.

In het project "Toestandsbepaling PVC" zijn twee opbrengsten beoogd:

1. de Non-Collinear Wave Mixing techniek die momenteel wordt ontwikkeld door Wetsus te valideren met behulp van de meetresultaten van proefstukken die eerder waren beproefd op weerstand tegen langzame scheurgroei.
2. Een classificatiesysteem voor PVC leidingen.

Omdat de resultaten van bovenstaande punten een beperkt rapport opleveren, is er voor gekozen de resultaten van dit onderzoek samen te voegen met de wijzigingen in het rapport BTO 2015.054. Voorliggend rapport (BTO 2018.009) bestaat hiermee uit de gewijzigde versie van BTO 2015.054 plus twee toegevoegde hoofdstukken die ieder de bovengenoemde opbrengsten weergeven. Het rapport besluit met aangepaste conclusies.

Jaar van publicatie
2018

Meer informatie
ing. George Mesman
T 0306069571
E george.mesman@kwrwater.nl

Keywords
PVC, veroudering, kennisregels,
leidingen

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

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

KWR Watercycle
Research
Institute

BTO 2018.009 | januari 2018 © 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.

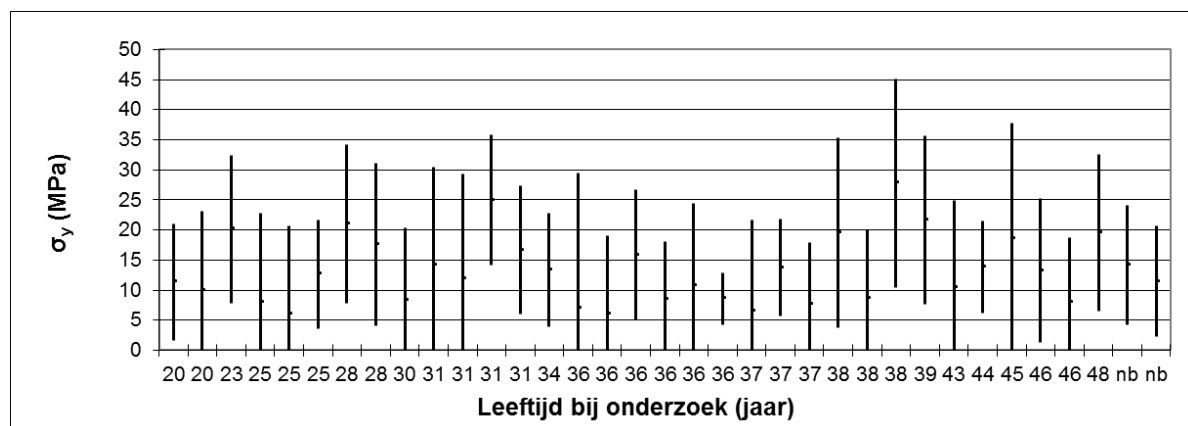
BTO Managementsamenvatting

Kennisregels zijn bruikbaar voor het beheer van PVC leidingen

Auteur(s) ing. G.A.M. (George) Mesman, Dr.ir. K.A.(Karel) van Laarhoven

In de Nederlandse drinkwaterindustrie wordt sinds halverwege de vorige eeuw op grote schaal PVC als leidingmateriaal gebruikt. Het aandeel van PVC leidingen in het totale drinkwaterdistributienet is 52% (2013). PVC wordt onder normale omstandigheden niet aangetast door drinkwater of door de grond, maar is wel onderhevig aan de degradatiemechanismen als chemische, mechanische en fysische veroudering. Hiervan is mechanische veroudering het belangrijkste; dit verouderingsmechanisme wordt gekarakteriseerd door de “weerstand tegen langzame scheurgroei”. In het afgelopen decennium is deze waarde in 35 buisdelen bepaald en deze vertoont een grote spreiding, zie onderstaand figuur. Fysische veroudering treedt op, maar verschilt sterk per leiding. Chemische veroudering treedt op gedurende de fabricage bij hoge temperaturen, maar speelt onder gebruiksomstandigheden geen rol. De bestaande kennis over PVC leidingen is verzameld en in kennisregels gevat om het storingsgedrag en de restlevensduur van PVC leidingen te kunnen beoordelen. De belangrijkste geformuleerde kennisregels zijn:

- PVC leidingen die zijn geproduceerd voor 1980 hebben een, voor PVC, relatieve hoge storingsfrequentie;
- Bij een bekende spanning en een uit onderzoek bekende “weerstand tegen langzame scheurgroei” is de levensduur van een PVC leiding voldoende nauwkeurig te voorspellen;
- De “weerstand tegen langzame scheurgroei” kent een grote spreiding en kan slecht voorspeld worden,;
- Veroudering komt voor in de onderzochte buisdelen maar heeft geen directe relatie met parameters als DCMT of leeftijd.



Geëxtrapoleerde 50-jaar sterkte uit 35 verschillende onderzoeken. De weerstand tegen langzame scheurgroei met het 95% betrouwbaarheidsinterval per meting, gesorteerd op leeftijd (jongste buisdelen staan links).

Naast de kennisregels is een testmethode voor het bepalen van de mate van fysische veroudering (Non Colinear Wave Mixing, NCWM) en de toestand van het huidige aanwezige bestand PVC leidingen beoordeeld. NCWM geeft nog geen meetbare relatie met de mate van fysische veroudering, de techniek moet nog geoptimaliseerd worden. Binnen het huidige bestand van PVC leidingen is een beperkte indeling zichtbaar waarmee sanering van leidingen op basis van eigenschappen voorspelbaar is.

Belang: het drinkwaternet in Nederland bestaat voor 52% uit PVC en veroudert

Vanaf 1950 is PVC als leidingmateriaal toegepast en sinds die tijd zijn de fabricagemethoden van het PVC en van de buisdelen, de samenstelling van het PVC en de eisen aan het materiaal veranderd. Er is dus een grote variëteit in kwaliteit en bijbehorend storingsgedrag. De storingsfrequenties zijn laag, maar de storingen worden gekenmerkt door een schijnbare onvoorspelbaarheid. Het verkleinen van die onvoorspelbaarheid kan waterbedrijven helpen de juiste beslissingen te nemen bij het assetmanagement van PVC leidingen en het aantal storingen te beperken.

Aanpak: kennisregels geformuleerd op basis van bestaande informatie

In de afgelopen jaren is veel informatie over PVC leidingen en het gedrag van PVC leidingen in het waterleidingnet gegenereerd op basis van materiaalonderzoek (regulier en schadeonderzoek), registreren van storingen en onderzoek naar schademechanismen. De resultaten van deze onderzoeken zijn verzameld, nader geanalyseerd, in perspectief geplaatst en uitgewerkt tot kennisregels. Ook is de historie en de normalisatie van het materiaal beschreven, zodat onderzoek aan een bestaande leiding gerelateerd kan worden aan de ten tijde van de productie geldende normen. Voor de ontwikkeling van een meetmethode voor het vaststellen van fysische veroudering (NCWM) zijn monsters ter beschikking gesteld en getracht een relatie vast te stellen. De vervangingen in het PVC leidingnet in de periode 2014 - 2016 zijn geïnventariseerd waarmee cohorten met een hoge storingsfrequentie te identificeren zijn.

Resultaten: met nieuwe set kennisregels is storingsgedrag te voorspellen

PVC is onderhevig aan degradatiemechanismen, namelijk chemische, mechanische en fysische veroudering. Hiervan is mechanische veroudering het belangrijkste; dit wordt gekarakteriseerd door de "weerstand tegen langzame scheurgroei". Fysische veroudering treedt op, maar verschilt sterk per

leiding en is nog niet meetbaar met NCWM. Chemische veroudering treedt op bij hoge temperaturen gedurende het fabricageproces, maar speelt onder gebruiksomstandigheden geen rol. De storingsfrequentie van het materiaal is over het algemeen laag en heeft een grote spreiding. Een cohort indeling is slechts beperkt mogelijk, leidingen uit de periode van voor 1980 kennen een iets hogere storingsfrequentie dan leidingen uit de periode van na 1980. Met een combinatie van sterktebepaling en liggingsomstandigheden blijkt het mogelijk om het storingsgedrag van een PVC leiding te voorspellen. Hoge materiaalspanning dient vermeden te worden: uitvoeren van een leiding in een lage drukklasse levert dus een grotere storingskans op. Het productiejaar heeft duidelijk invloed op het storingsgedrag. De aanwezige veroudering in het materiaal is zeer divers en veroorzaakt, zonder nader materiaalonderzoek, een onvoorspelbare conditie.

Implementatie: conditie PVC waterleidingen te bepalen op basis van regels en divers onderzoek

De conditie van een PVC waterleiding is niet met een enkele regel vast te leggen. Het is een combinatie van onderzoek naar de materiaaleigenschappen van de betreffende leiding en de belastingsomstandigheden, voortkomend uit de omgeving. Voor leidingen met een groot effect bij storen kan het risico op storen bepaald worden uit de combinatie van deze onderzoeken. Leidingen met een hoog aantal storingen verdienen extra onderzoek naar de oorzaak van het hoge aantal storingen om te bepalen of de oorzaak ligt in een lage waarde van een materiaaleigenschap of een hoge belasting. Het heeft voorkeur bij aanleg van PVC-leidingen te kiezen voor een hoge drukklasse om de materiaalspanning tijdens gebruik laag te houden.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in rapport BTO-2018.009 "Kennisregels PVC leidingen, update 2017"

Jaar van publicatie
2018

Meer informatie
ing. George Mesman
T 0306069571
E george.mesman@kwrwater.nl

Keywords
PVC, veroudering, kennisregels, leidingen

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

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

KWR Watercycle
Research
Institute

BTO 2018.009 | januari 2018 © 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.

Inhoud

Inhoud	1
1 Inleiding	3
1.1 Onderzoek	3
1.2 Belang van het onderzoek	3
1.3 Rapportstructuur	4
2 Toepassing PVC in het drinkwaternet	5
2.1 Aanwezige PVC leidingen in drinkwaternet	5
2.2 Productiehistorie	5
2.3 PVC kwaliteitseisen 1965 – 2014	6
2.4 PVC leidingsystemen	7
3 Uitgevoerd onderzoek	9
3.1 Onderzoek Aging (L.C.E. Struik 1977)	9
3.2 Onderzoek TNO 2004	9
3.3 Uitgevoerd materiaalonderzoek 2005 – 2014 (KWR)	10
3.4 Onderzoek push fit joints	14
3.5 Mogelijk optreden van RCP	14
3.6 Ustore data voor PVC	15
3.7 Kennis en onzekerheden	18
4 Conditieverloop PVC leidingen	19
4.1 Faalmechanisme	19
4.2 Veroudering van het PVC	20
4.3 Aanwezige inwendige materiaalspanningen	20
4.4 Verwachte spanningen in het materiaal	21
4.5 Onverwachte spanningen in het materiaal	22
4.6 Onderscheid in het type van falen	23
5 Kennisregels PVC	26
5.1 Algemeen	26
5.2 Proactieve benadering	26
5.3 Reactieve benadering	27
5.4 Storingsfrequentie	27
5.5 Samenvatting PVC leidingen	27
6 Witte vlekken	28
7 Validatie van de noncolinear wave mixing techniek met proefstukken uit het veld	29
7.1 Inleiding	29
7.2 Proefstukken	30
7.3 Noncollinear Wave Mixing	30
7.4 Meetresultaten	30

7.5	Discussie en aanbevelingen	33
8	Toestand huidige leidingnet PVC	35
8.1	PVC in het waterleidingnet	35
8.2	Vervallen leidingen in het huidige net	36
8.3	Cohortindeling	38
8.4	Prioritering vervangingen, langetermijnplanning	38
9	Conclusies	40
10	Literatuur	41
	Bijlage I Overzicht eisen PVC	43

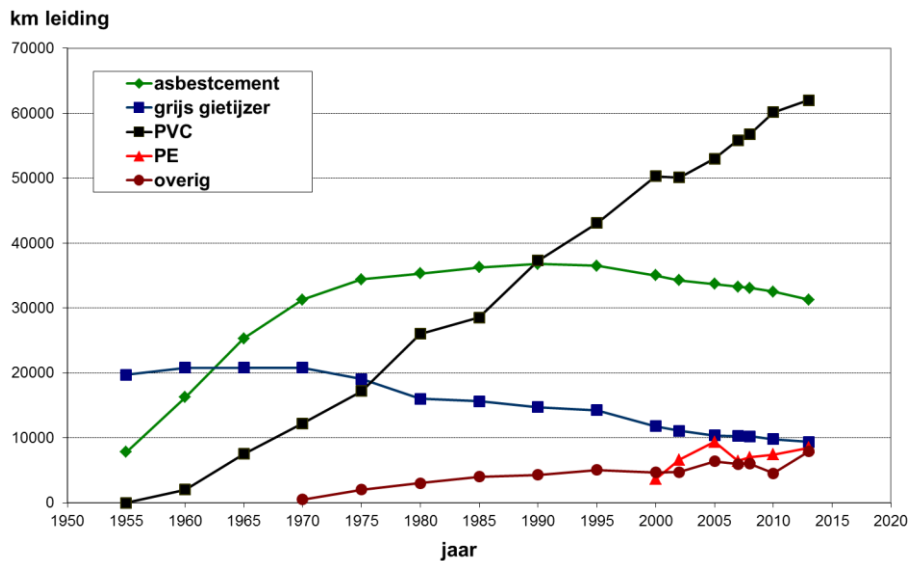
1 Inleiding

1.1 Onderzoek

Binnen het BTO is in 2004 door TNO onderzoek gedaan naar PVC. Sinds die tijd is meer kennis opgedaan aan de hand van onderzochte schadegevallen. In dit rapport worden deze schadegevallen in samenhang geanalyseerd. Verder wordt geëvalueerd of inzichten uit de gaswereld met Rapid Crack Propagation en het TTI-W met inspectietechnieken en hoekverdraaiing nieuwe bruikbare inzichten kunnen opleveren voor de conditiebepaling voor PVC drinkwaterleidingen. Op basis van de uitgevoerde analyses zijn kennisregels samengebracht voor PVC drinkwaterleidingen in Nederland. Een en ander is gerapporteerd in het rapport BTO 2015.054. In de periode 2015 - 2017 is onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van de non destructieve ultrasone techniek de Non Colineair Wave Mixing en is de vervanging van PVC drinkwaterleidingen geïnventariseerd en geanalyseerd.

1.2 Belang van het onderzoek

PVC als leidingmateriaal voor drinkwaterleidingen is ontwikkeld in de periode na de tweede wereldoorlog. Er was een gebrek aan grondstoffen en de drinkwatersector was op zoek naar een nieuw materiaal naast grijs gietijzer en asbestcement. Het materiaal moest chemisch inert zijn vanwege de drinkwaterfunctie, licht in gewicht vanwege de eenvoud bij aanleg, sterk genoeg om de inwendige waterdruk, de grondbelasting en eventuele verkeersbelasting te kunnen weerstaan en de prijs moest uiteraard laag zijn. De Waterleiding Maatschappij Overijssel heeft de ontwikkeling van een PVC waterleidingbuis die aan de genoemde randvoorwaarden voldoet op zich genomen in samenwerking met Shell. In 1955 is WAVIN (WAter en VINylchloride) opgericht. In deze tijd kwamen ook andere fabrikanten met PVC waterleidingartikelen, zoals Polva en Dyka en heeft de productie van PVC leidingmateriaal een grote vlucht genomen. Inmiddels bestaat iets meer dan de helft van het Nederlandse drinkwaterleidingnet uit het materiaal PVC. De ontwikkeling van het waterleidingennet sinds 1955 is afgebeeld in figuur 1. In 1955 bestond het waterleidingnet uit leidingen van grijs gietijzer of asbestcement, de totale lengte bedroeg ongeveer 30.000 km. Het leidingnet in 2013 is 118.945 km lang en het aandeel PVC hierin bedraagt 61.994 km. De knik in de lijn PVC rond het jaar 2000 wordt veroorzaakt door het expliciet maken van het materiaal PE in de statistiek.



Figuur 1 Ontwikkeling waterleidingnet in Nederland [12]

Drinkwaterleidingen van PVC worden in Nederland sinds 1955 op industriële schaal vervaardigd. Het was onvermijdelijk dat vanaf dit moment wijzigingen in grondstoffen, productie en eindproduct werden doorgevoerd op basis van de mogelijkheden en ervaring bij productie en gebruik van de buizen. Er bestaat behoefte aan de kennis en ervaringen over de periode vanaf 1955. Een overzicht hiervan en de consequenties van sommige wijzigingen zijn in dit onderzoek in kaart gebracht.

1.3 Rapportstructuur

In het rapport wordt in hoofdstuk 2 ingegaan op de historie van de productie van PVC buizen, aanleg van PVC leidingen en de eisen die hieraan gesteld werden en worden. In hoofdstuk 3 wordt het onderzoek dat is uitgevoerd aan PVC buisdelen en leidingen samengevat. In hoofdstuk 4 is het conditieverloop besproken en zijn de kennisregels afgeleid. In hoofdstuk 5 zijn de kennisregels samengevat. De geconstateerde witte vlekken in de kennis van de PVC leidingen zijn in hoofdstuk 6 verzameld.

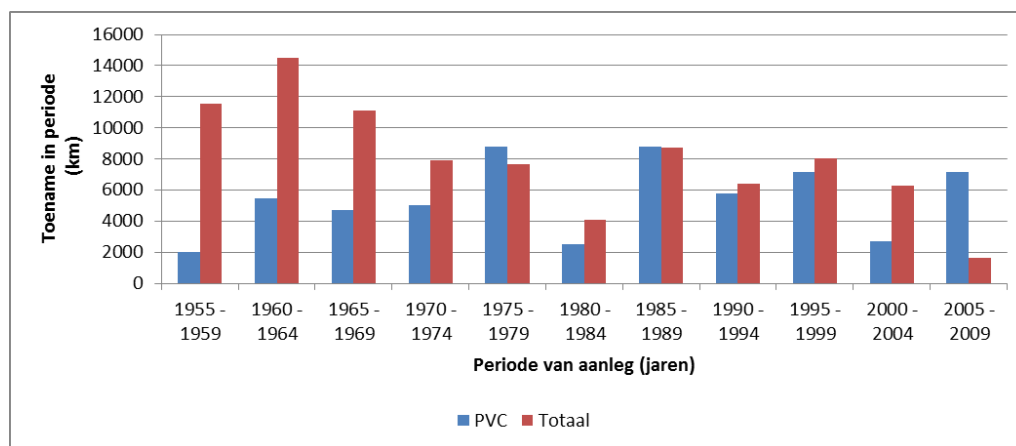
De afgeleide kennisregels komen in kaders terug bij de onderwerpen waaruit de regels zijn afgeleid.

In hoofdstuk 7 is het resultaat van de huidige (eind 2017) mogelijkheden van de Non Colinear Wave Mixing techniek gepresenteerd en in hoofdstuk 8 de resultaten van de inventarisatie van de mogelijke cohorten binnen het PVC leidingen bestand bij de Nederlandse Waterleidingbedrijven.

2 Toepassing PVC in het drinkwaternet

2.1 Aanwezige PVC leidingen in drinkwaternet

Uit de statistiek van de aanleg van PVC leidingen door de jaren heen is bepaald welke hoeveelheden PVC in perioden van 5 jaar gelegd zijn in Nederland, zie figuur 2. Dit is een benadering van de werkelijke situatie omdat een leiding in 1960 gelegd kan zijn maar inmiddels mogelijk geruimd is. In de periode 2005 - 2009 is meer PVC aangelegd dan de totale toename van het leidingnet, in deze periode is de sanering van leidingen (gietijzer, AC en ook PVC) sterk toegenomen ten opzichte van nieuwe aanleg en dit is voor een groot deel in PVC uitgevoerd.



Figuur 2 Toename PVC en totale hoeveelheid drinkwaterleiding in perioden van 5 jaar in Nederland [12].

Zoals uit de cijfers blijkt schommelt de aanleg van PVC drinkwaterleidingen rond 1000 km per jaar (60.000 km in 55 jaar). Inzicht in deze cijfers is van belang omdat in de loop van de PVC-historie zich wijzigingen hebben voorgedaan in de productie en de materiaaleisen die invloed gehad hebben op de kwaliteit van de buizen.

De verdeling van de lengte per periode van aanleg in diameter en drukklassen (wanddikten) is niet beschikbaar voor de totaalcijfers.

2.2 Productiehistorie

Drinkwaterleidingen van PVC worden sinds 1955 op industriële schaal vervaardigd. Het is onvermijdelijk dat voor een destijds nieuw product wijzigingen in grondstoffen, productie en eindproduct doorgevoerd zijn op basis van de mogelijkheden en ervaring bij productie en gebruik van de buizen. Globaal worden de volgende perioden onderscheiden in de fabricage waarbij de jaartallen alleen indicatief zijn:

Tot 1966

De eerste fabricage van het polymeer PVC was van het type E-PVC, de E staat voor emulsie. Het polymeer komt hierbij tot stand volgens een emulsie polymerisatie. Hiernaast is het type S-PVC gekomen, de S staat voor suspensie. De polymeer komt tot stand in een suspensie. De eigenschappen van deze twee typen PVC zijn verschillend. E-PVC heeft een kleinere

molecuullengte (lagere k-waarde), is minder stabiel bij hogere temperaturen en in UV licht dan S-PVC. [10, 13]. E-PVC is rond 1966 uit productie genomen voor PVC waterleidingbuizen. Sinds die tijd is het basismateriaal voor waterleidingbuizen S-PVC en wordt dit onderscheid niet meer aangeduid.

Het PVC werd vervolgens tot een granulaat verwerkt met de bijbehorende hulpstoffen. Dit granulaat werd vervolgens in de extruder tot een buis geëxtrudeerd. Het materiaal is in dit proces twee maal gesmolten, eerst tot granulaat en vervolgens in de extruder. Dit heeft invloed op de materiaaleigenschappen, met name op de geleergraad van het PVC heeft dit een positieve invloed [13].

De geleergraad van het materiaal is een essentiële eigenschap. Onder de geleergraad wordt de mate van versmelten van de PVC deeltjes tot een homogene massa verstaan. Een lage geleergraad resulteert in een materiaal met een lage stijfheid, lage sterkte en lage taaiheid, een hoge geleergraad resulteert in een materiaal met een hoge stijfheid en sterkte maar het materiaal wordt brosser. [2]

Periode 1966 tot 1970

In deze periode is een start gemaakt met de productie via een "dry-blend". Dit is een mengsel van PVC en toeslagstoffen die niet meer tot een granulaat gesmolten worden voor de extrusie. De geleergraad van volgens deze methode gefabriceerd PVC kan lager zijn dan gewenst. De geleergraad werd getest met de acetonproef. Deze proef is niet onderscheidend genoeg om een te lage geleergraad van dit materiaal voldoende aan te tonen [13].

Periode 1970 tot 1976:

Vanaf 1970 zijn de buizen vervaardigd uit een "dry-blend". De controle op geleergraad is nog steeds de acetonproef waarmee geen onderscheid gemaakt kan worden tussen onvoldoende en voldoende geling. Na problemen met de kwaliteit van deze waterleidingbuizen is gezocht naar een onderscheidende test. Die is gevonden in de weerstand tegen aantasting door dichloormethaan. Dit heeft geresulteerd in 1976 in het opnemen van de DCMT test (weerstand tegen aantasting door dichloormethaan bij een bepaalde temperatuur) in de keuringseisen K49 [13].

Na 1976

In de periode na 1976 zijn de ontwikkelingen vooral geleidelijk (receptuur, productiemethoden) gegaan en deze zijn beperkt van invloed.

Uit deze historie komen de volgende kenmerkende jaren naar voren die van belang zijn voor de beoordeling van PVC waterleidingbuizen op basis van productie:

1955	start industriële vervaardiging PVC waterleidingbuizen
1966	Alleen nog S-PVC als grondstof voor PVC waterleidingbuizen
1970	Dry-blend als basis voor fabricage, wegvallen samensmelten tot granulaat
1976	Testen geleergraad met de DCMT test

2.3 PVC kwaliteitseisen 1965 – 2014

Met de fabricage van drinkwaterleidingen in een nieuw materiaal heeft het even geduurd voor er eisen ten aanzien van het materiaal en de producten van dit materiaal tot stand zijn gekomen. De eerste keuringseisen K49 stammen uit 1965. Hierin zijn eisen geformuleerd ten aanzien van eigenschappen die het materiaal of de buis dienen te bezitten. Deze zijn geïnventariseerd uit de verschillende publicaties. Na 1965 zijn de eisen K49 uitgebreid en/of aangepast in 1972 en 1977. In 1991 verschijnt BRL-K502/02 en in 2001 verschijnt BRL K17301 waarin de eisen voor PVC leidingssystemen vast liggen. In Bijlage I is een overzicht gegeven van de inhoud van de verschillende keuringseisen en beoordelingsrichtlijnen, in tabel 1 zijn de eisen door de jaren heen samengevat.

Tabel 1 Samenvatting parameters eisen PVC buizen [6]

Parameter	K49 (1965)	K49 (1972)	K49 (1977)	BRL502/02 (1991)	BRL17301 (2007)
Sterkte 1 uur 20°C	420 kgf/cm ²¹	42 MPa	42 MPa	42 MPa	42 MPa
Sterkte 100 uur 20°C	-	35 MPa	35 MPa	35 MPa	35 MPa
Sterkte 1000 uur 60°C	100 kgf/cm ²	10 MPa	10 MPa	12,5 MPa	12,5 MPa
Ontwerpspanning	100 kgf/cm ²	12,5 MPa	12,5 MPa	12,5 MPa	-
MRS 50 jaar	-	-	-	-	25 MPa
Weerstand tegen slag of stoot	Ja	Ja	Ja	Verzwaard	Verzwaard
Vicat verweking	> 76°C	> 76°C	> 76°C	> 80°C	> 80°C
DCMT	-	-	4L;4,2L;4L	0-0,0-0	0-0,0-0
Merken	Nominale druk en fabriekskennmerk op buiseinden	Uitgebreid, code toegestaan	Uitgebreid, code toegestaan	Uitgebreid	Uitgebreid, code toegestaan

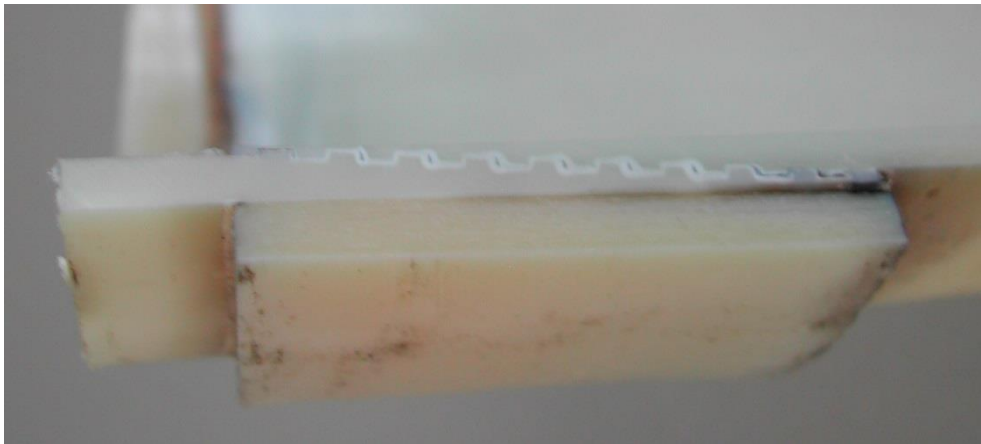
2.4 PVC leidingsystemen

Met de ontwikkeling van de PVC buizen is ook het PVC leidingsysteem ontwikkeld. Een leidingsysteem bestaat uit buizen, verbindingen en hulpstukken die gezamenlijk de vereiste functionaliteit invullen die van het systeem gevraagd wordt.

De herkomst van de nominale diameters (buitendiameters) in PVC is niet duidelijk, het lijkt erop dat de binnendiameters zoveel mogelijk zijn aangesloten bij de binnen diameters van de traditionele materialen, een \varnothing 110 mm is inwendig bijna \varnothing 100 mm zoals een 4" gietijzeren leiding of een \varnothing 100 mm AC. In 1965 zijn de diameters tot en met 400 mm in de keuringseisen K49 vastgelegd. Voor de diameters > 400 mm wordt in K49 (1965) verwezen naar de voorkeurreeks R20 volgens het normblad N3070. In K49 (1972) is de volledige reeks diameters vastgelegd tot en met \varnothing 1000 mm.

Wat betreft hulpstukken is er vooral in de beginperiode veel geëxperimenteerd. Gelijmde schroefverbindingen komen voor waarbij rond de verbinding versterkingen gelijmd zijn, zie figuur 3. Lijmverbindingen in de kleinere diameters (tot 200 mm) kunnen plaatselijk in het werk zijn gemaakt door verhitten en optrompen (is het wijder maken van een buiseind waardoor een andere buis met dezelfde diameter in dit buiseind geschoven kan worden). Ook bochten in kleine diameters kunnen in het werk zijn gebogen na verhitten van een buisdeel.

¹ De eenheid kgf is de oude eenheid (voor het SI stelsel) voor kracht, deze komt overeen met 9,81 N in het SI. De eenheid kgf/cm² is de oude eenheid voor druk, deze komt overeen met 9,81 N/100 mm², dit komt bijna overeen met 100.000 Pa (N/m²) in het SI (= 0,1 MPa of 100 kPa).



Figuur 3 Voorbeeld van een schroefdraadverbinding in \varnothing 107 mm PVC leiding (van voor K49 (1965)). De leiding in de foto is opengezaagd over de lengte en vervolgens gepolijst op de verbinding. In de verbinding is een rechthoekig schroefdraad zichtbaar met een verstevigingsring aan de buitenzijde van de buis.

In de loop van de tijd is vooral de steekverbinding met rubberring afsluiting als standaard gaan gelden. Deze verbinding kan snel gemaakt worden en heeft als voordeel dat een beperkte hoekverdraaiing (tot 3° per insteek) mogelijk is. Op deze wijze blijven bij zettingsverschillen spanningen in longitudinale richting beperkt. Steekverbindingen kunnen met enkelzijdige moffen (mof aan de buis) of met dubbelzijdige moffen (losse moffen) gemaakt worden. Bij dubbelzijdige moffen is per verbinding 6° hoekverdraaiing mogelijk.

Daar waar trekkrachten op de leiding worden uitgeoefend, bij eindkappen, bochten, T-stukken en afsluiters, is een trekvast koppeling mogelijk, uitgevoerd volgens "NEN-EN-ISO 13783:1997 en". Lijmen van koppelingen is mogelijk tot een diameter van 160 mm (BRL 17301), verbindingen in grotere diameters of verbindingen die niet gelijmd worden kunnen trekvast gemaakt worden in het systeem volgens de leverancier. De spanningen in een trekvast systeem worden bij groundbeweging (horizontaal en verticaal) hoger dan bij steekverbindingen.

PVC leidingsystemen zijn in verschillende drukklassen (maximum inwendige druk) uitgevoerd. De huidige drukklassen zijn 0,5, 0,63, 0,75, 1,0, 1,25 en 1,6 MPa. De drukklassen komen tot stand op basis van de wanddikte en een wandspanning van ongeveer 12 MPa (MN/m^2 of N/mm^2). Hiernaast bestaat de indeling in SDR waarde (Standard Dimension Ratio) die de verhouding tussen de buitendiameter en de wanddikte weergeeft, beschikbaar zijn SDR 51, 41, 34, 26, 21 en 14. De wanddikte neemt toe bij een lagere SDR waarde. Omdat de materialen in de loop van de tijd hogere waarden voor de verschillende eigenschappen hebben verkregen (toelaatbare spanning voor 1972 bedragen 10 MPa, na 1972 bedragen deze 12,5 MPa), maar de maatvoering (buitendiameter en wanddikten) gelijk is gebleven moet bij de beoordeling van de aangelegde systemen de oorspronkelijke waarden betrokken worden.

3 Uitgevoerd onderzoek

3.1 Onderzoek Aging (L.C.E. Struik 1977)

Fysische veroudering (aging) van amorfe kunststoffen zoals PVC is het onderwerp van het proefschrift "Physical aging in amorphous polymers and other materials" van L.C.A. Struik [9]. Amorfe kunststoffen bevinden zich niet in hun thermodynamisch evenwicht, hun specifieke volume is te groot. De moleculaire beweeglijkheid is klein maar niet nul. De stof beweegt zich zeer langzaam naar de evenwichtstoestand waarbij het materiaal stijver en brosser wordt.

De belangrijkste conclusies van het onderzoek zijn voor PVC:

- Fysische veroudering treedt op onder normale gebruikstemperaturen in het temperatuurgebied tussen en $-50 + 80$ °C;
- Fysische veroudering is van praktisch belang;
- Fysische veroudering gaat zeer lang door, bij normale gebruikstemperaturen ($T = T_g - 25$) tot honderden jaren;
T_g is de temperatuur waarbij de structuur van de stof naar een amorfe vaste stof overgaat, voor PVC basismateriaal bedraagt deze temperatuur $75 - 85$ °C [2]
- Glasachtige stoffen verouderen allemaal op ongeveer gelijke wijze.

3.2 Onderzoek TNO 2004

In 2004 is binnen het BTO voor de Nederlandse waterleidingbedrijven een onderzoek gestart naar het lange-termijn-gedrag van bestaande PVC waterleidingsystemen [2]. De reden voor dit onderzoek is het bereiken van de "technische" levensduur van de eerste PVC waterleidingen en de vraag in welke mate er rekening gehouden moet worden met deze levensduur van de PVC leidingen of dat de leidingen een langere levensduur hebben. De processen die de levensduur van een PVC leiding bepalen zijn in dit onderzoek in kaart gebracht. Dit betreft de processen:

- Chemische degradatie;
- Fysische veroudering;
- Mechanische degradatie.

3.2.1 Chemische degradatie

Aan het materiaal PVC worden stabilisatoren toegevoegd om schade door chemische degradatie te voorkomen bij fabricage bij hoge temperatuur van het product uit het PVC-poeder. Chemische degradatie treedt nagenoeg niet meer op na het afkoelen van het buisdeel na fabricage en het uitsluiten van UV straling. In het materiaal is voldoende stabilisator aanwezig voor de fabricage en de gebruiksfase. [2]

3.2.2 Fysische veroudering

Bij afkoeling van PVC tot onder de glasovergangstemperatuur na fabricage worden de moleculen in het materiaal vastgelegd in een toestand die thermodynamisch niet optimaal is. Het proces naar het thermodynamisch optimum wordt fysische veroudering genoemd en gaat gepaard met verandering van materiaaleigenschappen. Het effect op de materiaaleigenschappen kan groot zijn maar het proces verloopt zeer langzaam. Fysische veroudering treedt op in amorfe kunststoffen in de glastoestand, tussen -50 en $+80$ °C. Veroudering gaat zeer langzaam bij temperaturen $< (T_g - 25)$ (T_g is de glasovergangs-

temperatuur) ofwel bij $T < 50 - 60$ °C en gaat honderden jaren lang door. Materiaal uit de jaren '70 en '80 vertoonde in het onderzoek van TNO een grote afname van de weerstand tegen langzame scheurgroei bij versnelde veroudering. [2]

3.2.3 Mechanische degradatie

Onder mechanische degradatie in PVC buizen wordt slijtage, krassen en scheurvorming bij hoge spanning verstaan. Zolang dit niet optreedt en de wandspanning lager is dan 12,5 MPa wordt een levensduur van meer dan 100 jaar verwacht. Leidingen uit de jaren '70 en '80 kunnen een lagere levensduur vertonen. [2]

3.2.4 Conclusies TNO 2004

Uit het onderzoek volgt dat bij normaal gebruik langzame scheurgroei het dominante degradatieproces is. De invloed van fysische veroudering op langzame scheurgroei is groot in een slechte kwaliteit PVC en beperkt in een goede kwaliteit PVC. De verwachte levensduur van een buis uitgevoerd in een slechte kwaliteit PVC is sterk afhankelijk van de heersende spanning en varieert van enkele jaren tot 50 jaar. Een buis uitgevoerd in goed PVC heeft een levensduur die ook afhankelijk is van de heersende spanning maar wordt geschat op meer dan 100 jaar.

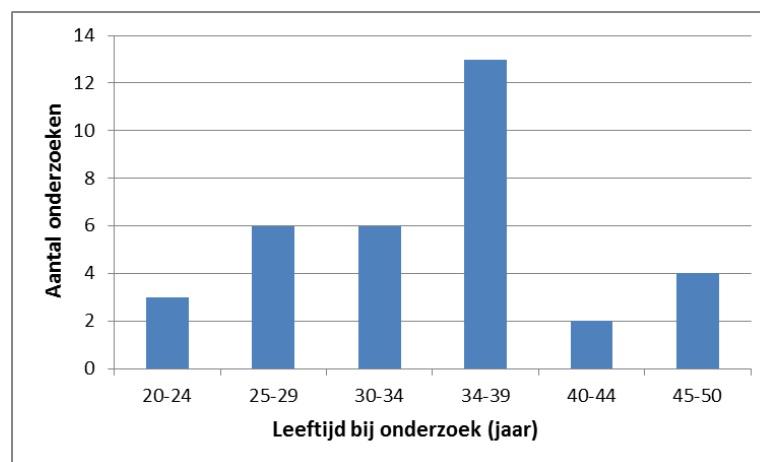
Fysische veroudering treedt altijd op maar veroorzaakt vooral in de niet optimaal gegeleerde PVC buizen een vermindering van de weerstand tegen langzame scheurgroei.

Mechanische degradatie leidt tot een vermindering van de weerstand tegen langzame scheurgroei vanwege het verkleinen van de wanddikte ter plaatse van de beschadiging.

Bestaande PVC buizen met een beperkte kwaliteit PVC kunnen een beperkte restlevensduur bezitten die afhankelijk is van de optredende wandspanningen en de aanwezige mechanische degradatie.

3.3 Uitgevoerd materiaalonderzoek 2005 - 2014 (KWR)

Vanaf 2007 heeft KWR in opdracht van een aantal waterleidingbedrijven onderzoek uitgevoerd naar de toestand van PVC buisdelen. Deze buisdelen zijn afkomstig van spontane schades (gesprongen buizen), schade door derden, inbouwingen en doelgerichte leidinguitnamen voor het onderzoek. In totaal zijn er anno 2017 35 buisdelen onderzocht. Van één buisdeel is het aanlegjaar onbekend zodat van 34 buisdelen de leeftijd ten tijde van het onderzoek bekend is, zie figuur 4. De leeftijden variërend in leeftijd van 20 tot 48 jaar, de aanlegjaren van de buisdelen in het onderzoek variëren van 1965 tot 1992.



Figuur 4 Leeftijden onderzochte buisdelen KWR onderzoek 2007 - 2017

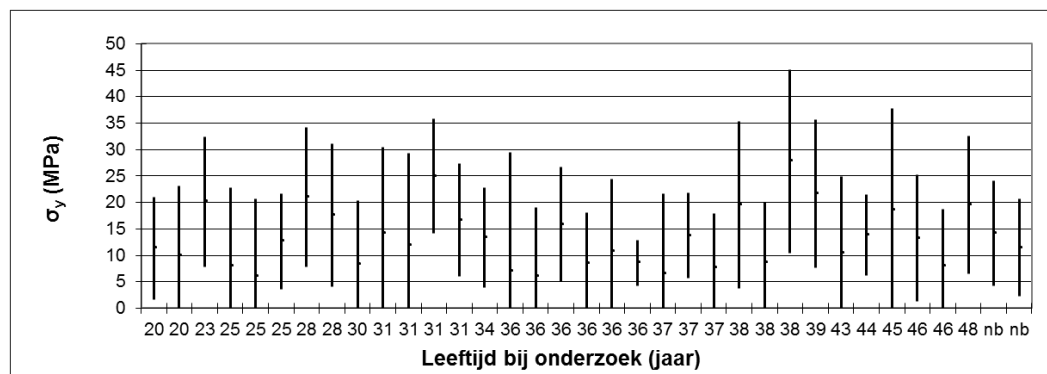
Het onderzoek naar de toestand van PVC buisdelen heeft zich geconcentreerd op de volgende testen:

- Visueel onderzoek van het buisoppervlak en bij schade van het breukvlak;
- DCMT test² volgens NEN-EN 580 (vigerend) of NEN7102 (historisch);
- Weerstand tegen langzame scheurgroei;
- Bepaling globale wandspanning op basis van inwendige druk (inclusief “rerounding”), bovenbelasting (diepteligging en eventuele verkeersbelasting) en opleghoek.

De weerstand tegen langzame scheurgroei wordt bepaald op 15 – 20 proefstukken uit de buiswand van één buisdeel. De proefstukken worden verschillend belast waarmee verschillende tijden tot bezwijken ontstaan. De resultaten uit een buisdeel worden geëxtrapoleerd waaruit de 50 jaar sterkte volgt en het 95% betrouwbaarheidsinterval. De soms aanwezige grote spreiding in de resultaten uit proefstukken uit een buis levert een breed 95% betrouwbaarheidsinterval, zie Figuur 5.

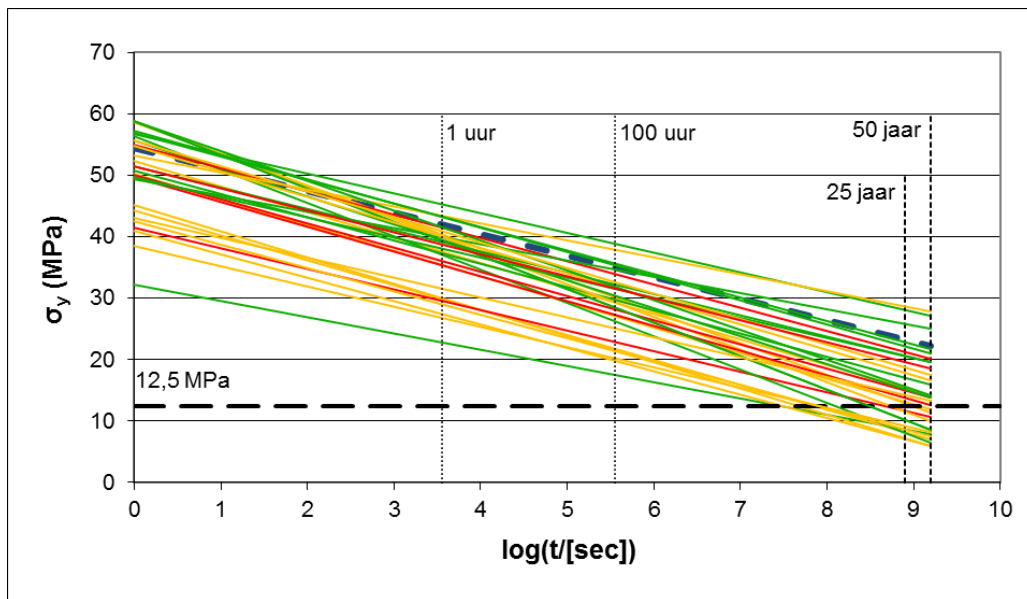
De weerstand tegen langzame scheurgroei is goed te bepalen op buisdelen. Van de 35 onderzochte buisdelen, zie figuur 6, voldoen er 32 niet aan de eis van 42 MPa gedurende 1 uur en er voldoen 32 buisdelen niet aan de eis van 35 MPa gedurende 100 uur. De eis van 25 MPa gedurende 50 jaar verkregen door extrapolatie van de resultaten wordt door 33 buisdelen niet gehaald.

De genoemde eisen gelden sinds 1965 (42 MPa gedurende één uur) en 1972 (35 MPa gedurende 100 uur). De geleverde buizen zullen aan deze eisen moeten hebben voldaan. Dit betekent dat fysische veroudering aantoonbaar aanwezig is in 32 van de 35 buisdelen. Een barstdrukproef direct na productie, wordt afgebroken als de vereiste spanning gedurende de vereiste tijd wordt gehaald, hierdoor zijn de oorspronkelijke opneembare spanningen van de onderzocht buisdelen niet bekend en hiermee is de mate waarin de opneembare spanning is teruggelopen als gevolg van fysische veroudering ook niet bekend.



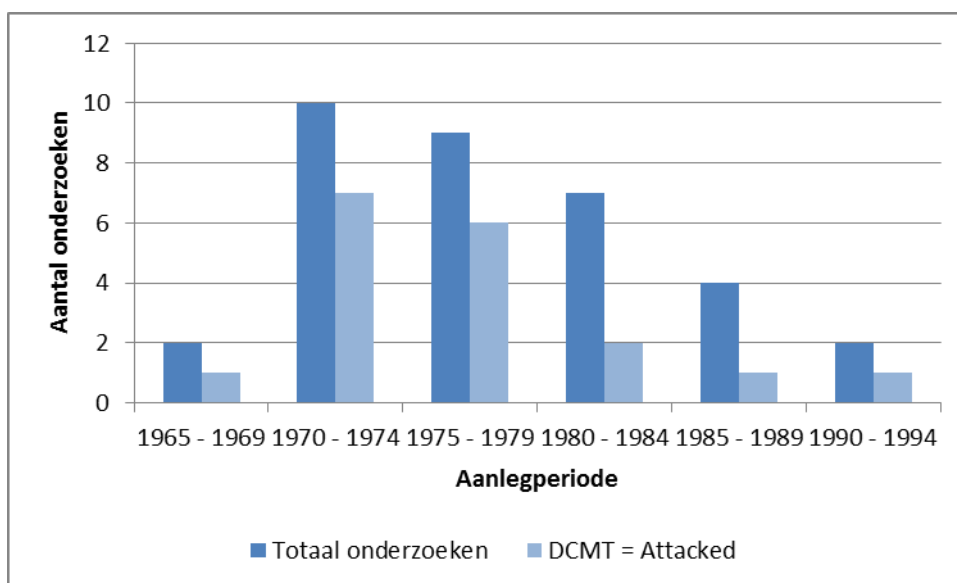
Figuur 5 Geëxtrapoleerde 50-jaar sterkte van 35 onderzoeken (Weerstand tegen langzame scheurgroei) met de 95% betrouwbaarheidsinterval per meting, gesorteerd op leeftijd (jongste buisdelen staan links).

² beide normen beschrijven een methode voor het bepalen van de weerstand tegen aantasting door dichloormethaan en worden benoemd in de beoordelingen. De interpretatie van het resultaat verschilt tussen de normen waarbij het resultaat volgens NEN 7102 vertaalbaar is naar NEN-EN 580. In NEN-EN 580 het onderscheid gemaakt tussen “attacked” en “not attacked”. Als een monster als “Attacked” wordt beoordeeld is de geleergraad te laag.



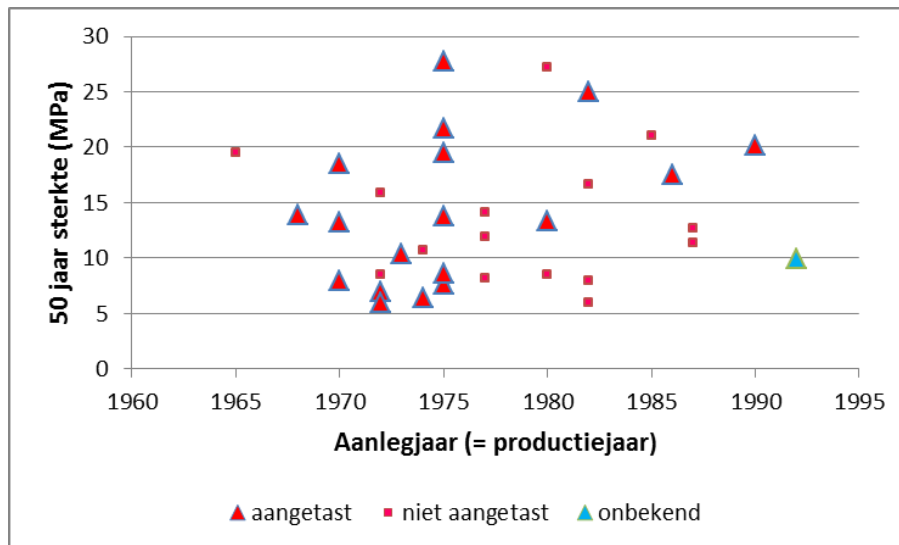
Figuur 6 Relatie tussen opneembare wandspanning en de logaritme van de tijd (seconden) "Weerstand tegen langzame scheurgroei" voor 35 buisdelen. De blauwe stippellijn is de lijn die bepaald wordt door de eis sinds K49 (1972), deze bedraagt 42 MPa gedurende 1 uur en 35 MPa gedurende 100 uur. De groene lijnen komen van buisdelen zonder storing, de oranje lijnen van buizen met een beperkte scheurlengte en de rode lijnen komen van buizen met een lengtescheur over de volledige buislengte.

Binnen het uitgevoerde onderzoek is van 34 buisdelen de DCMT bepaald, een aantal volgens NEN-EN 580 en een aantal volgens NEN7102. De resultaten van de bepalingen volgens NEN7102 zijn omgezet naar het onderscheid volgens NEN-EN 580 "attacked" of "not attacked". In figuur 7 zijn de resultaten van de DCMT test per aanlegperiode uitgezet. De periode van voor 1980 komt naar voren als periode waarin veel matig gelegeerde PVC buizen geproduceerd zijn.



Figuur 7 Aantal onderzoeken per aanlegperiode en de aantallen met een te lage geleergraad

Er is een relatie tussen de materiaaleigenschappen en de geleergraad. De geleergraad is in de onderzoeken getoetst met de DCMT test, deze test geeft alleen de aanwezigheid van ondergelering in het materiaal weer. Met de geleergraad neemt de dichtheid en de treksterkte toe maar wordt het materiaal ook brosser en gevoeliger voor impacts. De DCMT test maakt in de huidige uitvoering (NEN-EN 580) alleen onderscheid tussen “aangetast” en “niet aangetast”. In figuur 8 is de relatie tussen de uitslag van de DCMT test en de sterkte volgend uit de weerstand tegen langzame scheurgroei (50 jaar) van de uitgevoerde 35 proefstukken uitgezet. De hoogste sterkten worden gevonden in de buisdelen die als aangetast uit de test komen.

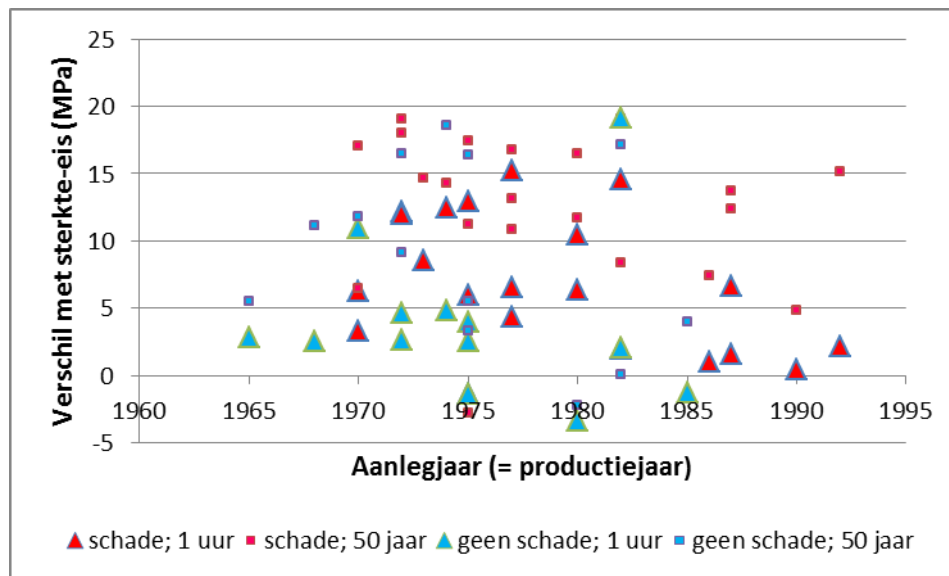


Figuur 8 Gextrapoleerde 50 jaar sterkte op basis van de weerstand tegen langzame scheurgroei voor DCMT = niet aangetast (blauw), en DCMT = aangetast (rood)

Hoewel sinds 1991 de eis “geen aantasting” geldt, is de uitslag “aangetast” voor een onderzocht buisdeel niet een absoluut negatief oordeel. De eis “niet aangetast” lijkt op een overschatting van de vereiste waarde. Een zware aantasting bij de DCMT test betekent wel dat dit een slecht gegeleerd materiaal is en daarmee matige materiaaleigenschappen kent.

De 50 jaar sterkte laat geen relatie zien met het jaar van aanleg. De grote spreiding in de resultaten komen over de volledige periode van onderzoek voor.

Over de liggingsduur van de onderzochte buisdelen vindt er fysische veroudering plaats van het materiaal. Uit de onderzoeksresultaten is de grootte van deze veroudering niet direct af te leiden omdat de oorspronkelijke sterkten niet bekend zijn. Door van de minimaal benodigde sterkte uit te gaan voor 1 uur (42 MPa) en 50 jaar (25 MPa) en te bepalen in hoeverre de gemeten sterkte hiervan afwijkt wordt een indruk verkregen van opgetreden veroudering van het materiaal. De grote verschillen (> 5 MPa) treden op in de buisdelen uit de periode 1972 - 1982, zie figuur 9. De schadegevallen vertonen de grootste verschillen met de eis, veroudering is hier in grotere mate opgetreden.



Figuur 9 Verschillen in sterkte met de eis voor 1 uur (42 MPa) en 50 jaar (25 MPa) voor de onderzochte buisdelen. De onderzoeken die op schademateriaal zijn uitgevoerd zijn rood weergegeven, in groen is het resultaat afkomstig van materiaal dat niet uit schades afkomstig is.

3.4 Onderzoek push fit joints

In het proefschrift "Lifetime prediction of PVC push-fit joints" van A.M. Arsenio [1] wordt de conditie van de verbindingen in een index vastgelegd (Index Joint Condition IJC). De verbinding faalt als deze gaat lekken; zolang de IJC binnen de grenzen blijft voor de betreffende diameter bestaat er geen gevaar voor falen (lekkende verbinding). De IJC kan worden vastgelegd bij aanleg en worden gebruikt als kwaliteitsoordeel over de aanleg. In het beheer van een leiding kan de IJC worden gebruikt om de toestand van de verbindingen te volgen. Verbindingen waar de criteria dreigen te worden overschreden kunnen worden opgegraven en aangepast waarmee hoge spanningen in de buisdelen worden voorkomen.

3.5 Mogelijk optreden van RCP

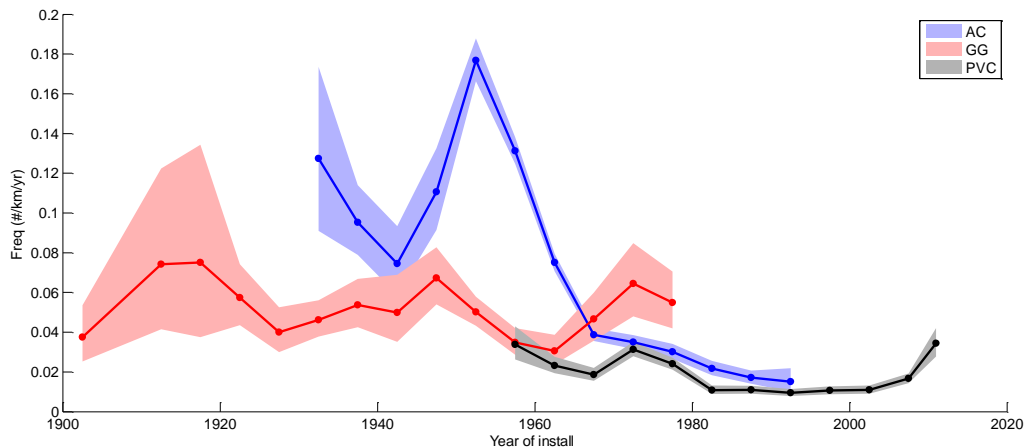
PVC buizen falen op twee verschillende wijzen, korte scheuren in lengterichting (30 – 400 mm lengte) of lengtescheuren over de volledige lengte van het buisdeel. Bij een lengtescheur over het volledige buisdeel is er over het algemeen sprake van "Rapid Crack Propagation". Het verschijnsel RCP is in 2012 – 2013 onderzocht door Kiwa Technology [4, 8] en uit het onderzoek volgt een afhankelijkheid van de volgende factoren:

- Drukklasse van het buisdeel;
In een hogere drukklasse treedt minder RCP op
- Diameter van de het buisdeel;
In een grotere diameter treedt meer RCP op
- Inwendige druk;
Bij een hogere inwendige druk treedt RCP meer op
- Aanwezige initiatie van scheurgroei;
Zonder initiatie treedt RCP niet op
- Niveau van inwendige materiaalspanning;
Bij hogere inwendige materiaalspanningen is de kans op RCP groter
- Lage temperatuur;
Bij een lage temperatuur is de kans op RCP hoger

- Geleergraad van het materiaal.
Bij een overgeleerde buis lijkt de kans op RCP groter

3.6 Ustore data voor PVC

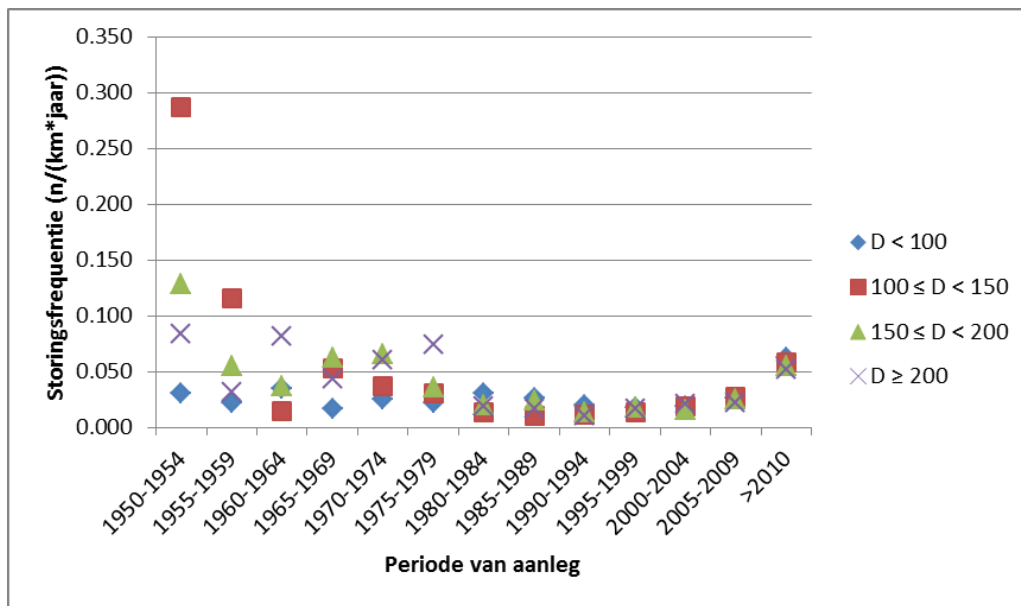
Ustore is een database van storingsgegevens, verzameld door de Nederlandse drinkwaterbedrijven (zeven van de tien, stand 2014) in de jaren 2009 – 2014. In Ustore kunnen de drinkwaterbedrijven hun storingsgegevens beheren, analyseren en vergelijken. Met deze gegevens wordt het mogelijk factoren te vinden die het optreden van storingen beïnvloeden. In figuur 10 zijn de storingsfrequenties (n/(km*jaar)) gegeven voor de drie belangrijkste materialen in het Nederlandse drinkwaternet (PVC, asbestcement en grijs gietijzer) per periode van aanleg.



Figuur 10 Storingsfrequenties per periode van aanleg (5 jaar). Bij minder dan 10 storingen zijn punten in de grafiek weggelaten. De bandbreedte vormt het 95% betrouwbaarheidsinterval. Voor de analyse zijn alle storingen gebruikt, ook storingen door derden. (Ustoreview nr 2).

In de database (november 2014) zijn 14.888 storingen aanwezig waarvan 2807 in PVC. Van deze storingen zijn in figuur 11 de storingsfrequenties (n/(km*jaar)), per diameterrange en per periode van aanleg weergegeven. De hoge storingsfrequentie voor de periode 1950 – 1955 is gebaseerd op slechts enkele storingen in een beperkte lengte en heeft daarmee een beperkte betrouwbaarheid. De periode 1960 – 1980 heeft een gemiddelde storingsfrequentie rond 0,03 per (km * jaar) waarbij de kleine diameters de laagste storingsfrequenties hebben. De periode 1980 – 2005 wordt gekenmerkt door lage storingsfrequenties en voor leidingen aangelegd vanaf 1990 is nauwelijks onderscheid tussen de diameterranges aanwezig.

De leidingen aangelegd na 2005 (korte liggingduur) vertonen een hogere storingsfrequentie. De verklaring hiervoor is nog niet duidelijk maar het is bekend dat de in nieuw aangelegde leidingnetten relatief veel storingen voorkomen die in de aanleg veroorzaakt zijn (fouten bij aanleg) of veroorzaakt worden door graafwerkzaamheden in het nieuwbouwgebied. Op basis van de geregistreeerde storingen zijn het vooral de grotere diameters die aangelegd zijn voor 1980 die een verhoogd risico op storen vertonen.

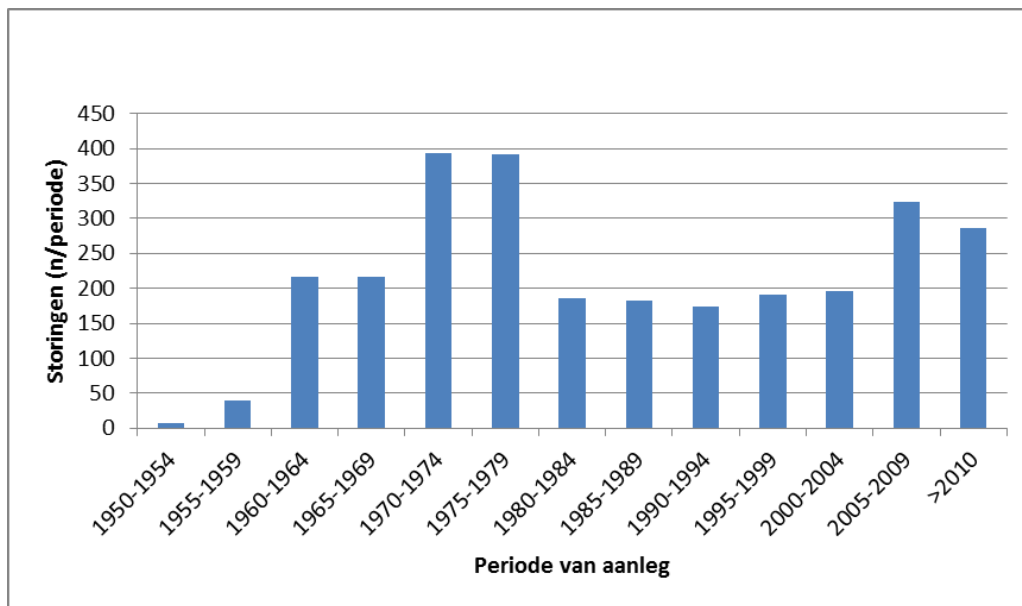


Figuur 11 Storingsfrequenties van PVC leidingen per periode van aanleg en diameterrange (Ustore november 2014)

Leidingen in een kleine diameter (< 150) kennen een lage storingsfrequentie. Omdat RCP ook minder kan voorkomen bij kleinere diameters kan inspectie, monitoring en effectbeoordeling meer gericht worden op grote diameters

De methode van aanleg van PVC drinkwaterleidingen heeft geen wezenlijke verandering ondergaan in de historie. Dit wijst erop dat de afname van de storingsfrequentie van de grotere diameters veroorzaakt wordt door het verbeteren van het eindproduct (PVC buis ≥ 200 mm). De in 1976 ingevoerde eis voor de aantasting door dichloormethaan bij een bepaalde temperatuur (DCMT-test) lijkt hierin het meest voor de hand te liggen. Hiermee is een directe controle en afkeur op geleergraad mogelijk geworden.

In de absolute aantallen storingen komt de periode 1970 – 1979 naar voren met verhoogde aantallen storingen, zie figuur 12.



Figuur 12 Aantallen storingen per periode van aanleg (Ustore november 2014). Omdat de storingsgegevens in Ustore nog een betrekkelijk korte registratieperiode hebben (sinds 2009), is er nog geen absolute zekerheid dat de oorzaak van de piek in de storingen ligt in het aanlegjaar, het kan ook de liggingduur zijn. In het geval dat het de liggingduur betreft, zal de piek in de loop van de komende jaren gaan schuiven. Gezien de productiewisselingen rond 1970 en de onzekerheid van de kwaliteit (geen eis voor de geleergraad op basis van DCMT testen voor 1976) is de verwachting dat het aantal storingen gebonden is aan de periode van aanleg.

Leidingen aangelegd in de periode < 1980 vertonen een verhoogd aantal storingen en een verhoogde storingsfrequentie.

Exacte informatie om een nader onderscheid te kunnen maken tussen omgevingsfactoren en materiaalfactoren ontbreekt in de gegevens van Ustore. De hiervoor benodigde gegevens zijn voor wat betreft PVC de volgende:

- Productiegegevens als productiedatum, fabrikant, batchnummer, drukklasse; Deze gegevens zijn terug te vinden in het stempel dat de buizen sinds 1972 op het materiaal hebben staan.
- DCMT of DSC waarde van het materiaal; Vanaf 1977 moet het materiaal aan de eis voor DCMT (K49, 1977) voldoen. De normering is aangepast in 1991 (BRL 502), sinds dat jaar zou het materiaal niet meer ondergeleerd mogen zijn.
- Weerstand tegen langzame scheurgroei; Uit onderzoek is gebleken dat dit de meest bepalende parameter is voor het falen van PVC leidingen [2]. Voor het materiaal geldt sinds 2007 een eis van 25 MPa voor 50 jaar. Door de weerstand tegen langzame scheurgroei te bepalen en 50 jaar sterkte te vergelijken wordt het optreden van fysische veroudering hiermee ook vastgelegd. Door de resultaten te verzamelen kan blijken in welke mate fysische veroudering optreedt in de verschillende batches buizen en wat de optredende spreiding is.
- Inwendige materiaalspanningen; Het materiaal heeft een bepaalde inwendige spanning. De hoogte van deze spanning

speelt een rol in de totale benadering van spanningen en bezwijkmechanismen en is relatief eenvoudig te bepalen op basis van een overlap in een doorbroken ring [2]

- **Bezwijkmechanisme.**
Een buisdeel kan een korte scheur vertonen of over de volledige lengte (RCP). Het optreden van RCP hangt van een aantal factoren af, zie paragraaf 3.5.
Hiernaast is het verschil tussen het bezwijken van het buisdeel of de verbinding van belang.

Voor wat betreft de ontbrekende omgevingsfactoren zijn dit:

- Inwendige druk, 300 – 500 kPa (30 – 50 mwk) in de meeste situaties
- Drukschommelingen (frequentie en amplitude);
- Diepteligging, 0,8 – 1,25 m in de meeste situaties;
- Verkeersbelasting, geen tot licht;
- Temperatuur indien RCP is opgetreden.

Een verwachte relatie tussen storingsfrequentie en zettingen is onderzocht maar in de Ustore gegevens nog niet aangetoond [7].

Om tot betere relaties tussen de leidingeigenschappen en de storingen te kunnen komen wordt hier aanbevolen om de volgende gegevens op te nemen in de storingsregistratie:

- Productiegegevens vanaf het stempel indien dit stempel aanwezig is en ook nog leesbaar;
- Diameter en wanddikte van de gestoorde buis;
- Bezwijkmechanisme, korte scheur of scheur over de volledige lengte
- Inwendige materiaalspanning op basis van de overlap van de doorbroken ring;
- Diepteligging van de leiding op 0,25 m nauwkeurig (bovenkant buis);
- Inwendige gemiddelde druk in het systeem op de storingslocatie op 5 mwk (50 kPa) nauwkeurig;
- De aanwezigheid van verkeersbelasting op de storingslocatie.

3.7 Kennis en onzekerheden

Voor het inschatten van de conditie of restlevensduur van een PVC buis zijn de volgende parameters van belang:

- Aanlegjaar / productiejaar;
- Diameter en wanddikte;
- Aanwezige beschadigingen (diepte van krassen, hoeveelheid krassen);
- Geleergraad van het materiaal;
- Inwendige materiaalspanningen;
- Inwendige druk;
- Bovenbelasting;
- Weerstand tegen langzame scheurgroei;
- Fysische veroudering van het materiaal.

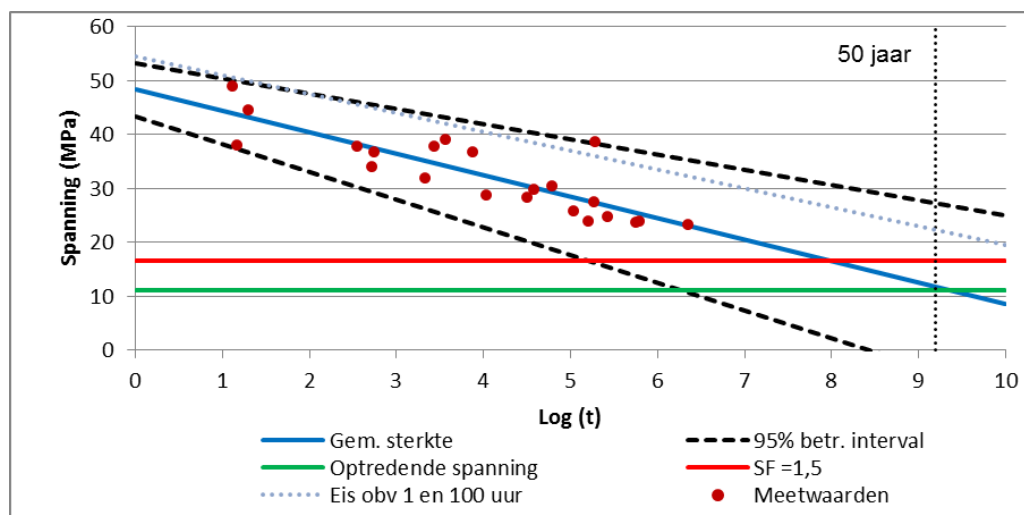
Van deze eigenschappen is de mate waarin fysische veroudering optreedt het minst bekend. Veroudering is het sterkst aanwezig in de buisdelen uit de periode 1970 – 1985. De relatie tussen fysische veroudering (gedefinieerd als de afname in sterkte bij 50 jaar) en de geleergraad is op basis van de 35 uitgevoerde onderzoeken niet aantoonbaar.

4 Conditieverloop PVC leidingen

4.1 Faalmechanisme

Drinkwaterleidingen kennen twee basisoorzaken van falen, “oorzaak derden” en het overschrijden van de bezwijkspanningen van het materiaal. Het fenomeen “oorzaak derden” valt buiten de scope van dit rapport. Het overschrijden van de bezwijkspanningen wordt in dit hoofdstuk nader behandeld.

De bezwijkspanning van PVC materiaal is afhankelijk van de tijd dat deze spanning op het materiaal aanwezig is. Op een logschaal in de tijd is dit verband lineair. Dit betekent dat een hoge spanning gedurende een korte tijd weerstaan kan worden en dat een lage spanning na lange tijd tot breuk zal leiden, deze eigenschap wordt vastgelegd in de “weerstand tegen langzame scheurgroei”. Uit het onderzoek van afgelopen jaren naar de weerstand tegen langzame scheurgroei volgen de conclusies dat de materiaalsterkte niet altijd voldoet aan de verwachting en dat er een behoorlijke spreiding optreedt rond de gemiddelde sterkte in een buisdeel (de proefstukken zijn uit één buisdeel afkomstig). In figuur 13 is het gemeten resultaat van een bepaling van de weerstand tegen langzame scheurgroei (blauwe lijn) opgenomen samen met de berekende optredende tangentiële spanning (groene lijn, 11 MPa) in het buisdeel. Deze spanning is bepaald op basis van inwendige druk en bovenbelasting. Door een veiligheidsfactor van 1,5 (arbitrair bepaald) op te nemen is het vereiste niveau van de sterkte van de buis bepaald (rode lijn, 16,5 MPa). Het snijpunt van de onderkant van het 95% betrouwbaarheidsinterval met de rode lijn ligt op $\log(t) = 5,22$ (47 uur) en het snijpunt met de groene lijn ligt op $\log(t) = 6,29$ (548 uur). Een storing in dit buisdeel ligt binnen de verwachting en dit onderzoek is uitgevoerd naar aanleiding van een aantal storingen. De snijpunten van de gemiddelde sterkte (blauw) liggen op $\log(t) = 7,98$ (3 jaar) voor de rode lijn (veiligheidsfactor = 1,5) en 9,36 (73 jaar) met de groene lijn (optredende spanning).



Figuur 13 Gemeten materiaalsterkten (\varnothing 500 mm, aanlegjaar 1970, jaar van onderzoek 2014) met de geëxtrapoleerde lange duur sterkte en het 95% betrouwbaarheidsinterval in combinatie met de optredende berekende spanningen (groene lijn). De rode lijn geeft het spanningsniveau aan waarbij een veiligheid op van 1,5 aanwezig is op de optredende spanning.

Het gemeten bezwijkgedrag (weerstand tegen langzame scheurgroei) is een eigenschap zoals deze bestaat op het moment van meten. De veroudering van het materiaal veroorzaakt een verlaging van de sterkte in de tijd en hiermee een verloop van de conditie in de tijd.

4.2 Veroudering van het PVC

De relevante vormen van veroudering zijn de fysische veroudering en de mechanische veroudering. De fysische veroudering wordt gestuurd door de omgevingstemperatuur en de uitgangssituatie van het materiaal. De materiaalsterkte van een geproduceerde buis moet voldoen aan een sterkte van 42 MPa gedurende één uur en 35 MPa gedurende 100 uur. Deze waarden worden bij productie gecontroleerd met een steekproef binnen de batch. Het betreffende buisdeel wordt onder de vereiste spanning gebracht gedurende de voorgeschreven tijd. Als het buisdeel heel blijft, wordt voldaan aan de eis en wordt de test beëindigd. In hoeverre de kwaliteit boven de eis ligt is met deze test niet bekend en hiermee is de uitgangssituatie voor de optredende veroudering niet bekend. In figuur 13 is de eis opgenomen in de lichtblauwe stippellijn, de gemeten gemiddelde sterkte (na 44 jaar) ligt daar onder. Op het onderzoektijdstip $t = 0$ ligt de sterkte 6,1 MPa onder de eis en op tijdstip 50 jaar ligt de sterkte 10,6 MPa onder de eis. Om deze waarden te kunnen bepalen is onderzoek noodzakelijk op het leidingmateriaal, de optredende veroudering is nog niet voorspelbaar.

Een hoge materiaalspanning verkort de levensduur van de leiding, de mate waarin dit gebeurd is afhankelijk van de materiaaleigenschap "Weerstand tegen langzame scheurgroei".

4.3 Aanwezige inwendige materiaalspanningen

De asymmetrische koeling (alleen aan de buitenzijde) bij de fabricage van de buizen levert een trekspanning op in het materiaal. Deze spanningen worden zichtbaar bij een lengtebreuk in een buisdeel, de delen gaan elkaar overlappen in spanningsloze toestand. De mate van overlap is een maat voor de inwendige materiaalspanning in originele toestand. Deze inwendige spanning varieert in grootte van twee tot vijf MPa en vermindert over de gebruiksduur van de buis. Deze spanning kan een rol spelen bij het breukgedrag van buisdelen in het systeem, met name bij het optreden van RCP. De inwendige spanning kan berekend worden op basis van de overlap van een buisring die spanningsloos gemaakt is door de ring door te snijden. De formule hiervoor is:

$$\sigma = \frac{\alpha}{4\pi} * \frac{w}{r} * E$$

$$\alpha \approx \frac{\Delta l}{r}$$

Waarin

σ	= tangentiële spanning (MPa)
α	= middelpuntshoek overlap (rad.)
Δl	= lengte overlap na doorsnijden ring (m)
r	= straal van de buis (m)
w	= wanddikte (m)
E	= elasticiteitsmodulus (MPa)

De inwendige materiaalspanning wordt in de beoordeling niet meegenomen omdat deze bij de opgestelde normen voor de beoordeling van het materiaal al aanwezig is geweest in het materiaal. De materiaaleigenschappen zouden een hogere waarde hebben als de inwendige materiaalspanningen niet aanwezig geweest zouden zijn bij het vaststellen hiervan.

4.4 Verwachte spanningen in het materiaal

De spanningen in een PVC buis zijn afhankelijk van de wanddikte, de uitwendige belastingen (grond- en verkeersbelasting), de inwendige druk, de wijze van aanleg en de inwendige materiaalspanning. De wanddikte van een PVC buis komt tot stand op basis van de gewenste drukklasse en een maximum materiaalspanning van ongeveer 12,0 MPa. De toelaatbare spanning in een PVC buis uit de periode 1972 – 2007 bedraagt 12,5 MPa (dit is een ontwerpgegeven), na 2007 is de eis voor de MRS (Minimum Required Strength, dit is een materiaalgegeven) van 25 MPa voor het materiaal opgenomen. Samen met een gewenste veiligheidsfactor op de materiaalsterkte levert dat de toelaatbare sterkte op. Bij een veiligheidsfactor van 2 bedraagt de toelaatbare spanning 12,5 MPa en bij een veiligheidsfactor van 1,5 bedraagt de toelaatbare spanning 16,7 MPa. De inwendige materiaalspanning wordt bij de overweging niet betrokken.

In tabel 2 zijn de resultaten van de spanningsberekening voor een aantal belastingcombinaties opgenomen. Doordat de verkeersbelasting bij grotere diepteligging tot lagere materiaalspanningen leidt en het reroundingeffect bij kleinere wanddikten een groter effect heeft, lijken de resultaten niet allemaal consistent. Diepere ligging geeft soms een lagere spanning en een hogere druk kan door het reroundingeffect ook tot een lagere spanning leiden. De resultaten voor de verschillende diameters in een gelijke drukklasse verschillen marginaal ten opzichte van elkaar (2-3%). De keuzes voor lage drukklassen (0,5 en 0,63 MPa) leveren hoge materiaalspanningen op (> 16,7 MPa).

Een numeriek model (COMSIMA - COMputation of Stresses In MAins) is ontwikkeld om de spanningen in de leiding te berekenen [11]. COMSIMA maakt gebruik van gegevens van de leiding, grond, zettingen, verkeer- en bovenbelasting en inwendige druk. Berekeningen kunnen zowel voor leidingen met starre verbindingen als leidingen met flexibele verbindingen worden uitgevoerd. COMSIMA berekent een spanning in de leiding alsmede een hoekverdraaiing van een verbinding. Falen treedt op als de toelaatbare spanning (in dit geval de vloeispanning van het materiaal) of de toelaatbare hoekverdraaiing wordt overschreden.

Tabel 2 Berekende optredende tangentiële spanningen in PVC leidingen met verschillende drukklassen bij verschillende belastingen, een grote opleghoek (120°) en aangelegd in zand. Vetgedrukt de combinaties die tot spanningen leiden boven 12,5 MPa (max. toelaatbare spanning tot 2007) en rood de combinaties die tot spanningen leiden boven 16,7 MPa (MRS (25 MPa)/1,5)

Diepteligging, inwendige druk, verkeersbelasting (300)	Materiaalspanning (MPa) in drukklasse leidingen			
	0,5 MPa	0,63 MPa	0,75 MPa	1,0 MPa
1 m, 0,4 MPa	13,2	11,4	10,0	7,9
1 m, 0,5 MPa	15,0	12,8	11,2	8,8
1 m, 0,4 MPa, VB	23,2	18,9	17,5	14,2
1 m, 0,5 MPa, VB	22,9	19,2	17,7	14,6
1,25 m, 0,4 MPa	14,0	12,3	10,9	8,6
1,25 m, 0,5 MPa	15,8	13,6	12,0	9,5
1,25 m, 0,4 MPa, VB	21,2	18,0	16,5	13,4
1,25 m, 0,5 MPa, VB	23,7	20,0	18,5	15,3

De theoretische optredende spanningen in PVC zijn in de drukklassen 0,5, 0,63 en 0,75 MPa hoog. Bij een lage weerstand tegen langzame scheurgroei beperkt deze spanning de levensduur.

4.5 Onverwachte spanningen in het materiaal

In een systeem komen naast de reguliere spanningen uit de bovenbelastingen en de inwendige waterdruk ook spanningen voor die ontstaan onder bijzondere omstandigheden. De meest voorkomende hiervan zijn:

- Zettingsverschillen;
- Stempelingen achter bochten, T-stukken en eindkappen;
- Vervorming van de buis om een gebogen tracé te maken, dit kan zowel horizontaal als verticaal (zinkerbochten);
- Lokale tijdelijke extra bovenbelasting;
- Zijdelingse verplaatsingen door horizontale grondbewegingen;
- Puntbelastingen op de leiding uit een onzorgvuldige sleufaanvulling;
- Puntbelastingen op de leiding door interferentie derden;
- Overgangen in materiaal waarbij de stijfheid van de constructie sterk verschilt.

Bij de beoordeling van deze bijzondere situaties moet beseft worden dat een spanning in de lengterichting ook resulteert in een spanning in tangentiële richting en andersom. Een leiding die onder inwendige druk komt, wordt korter en een leiding die onder trekspanning (bijvoorbeeld bij een eindkap) staat, wordt dunner. Het verband tussen deze verandering ligt vast in de dwarscontractiecoëfficiënt, deze bedraagt voor PVC 0,36. Dit betekent dat 36% van de spanning in lengterichting ook in tangentiële richting aanwezig is en andersom. Samen met de verwachte tangentiële spanningen kan een spanning in lengterichting de maximum opneembare spanning overschrijden. Dit is ook de reden waarom leidingen onder druk over het algemeen in lengterichting scheuren (als gevolg van tangentiële spanningen) als er een spanning in lengterichting bijkomt (bijvoorbeeld bij zetting).

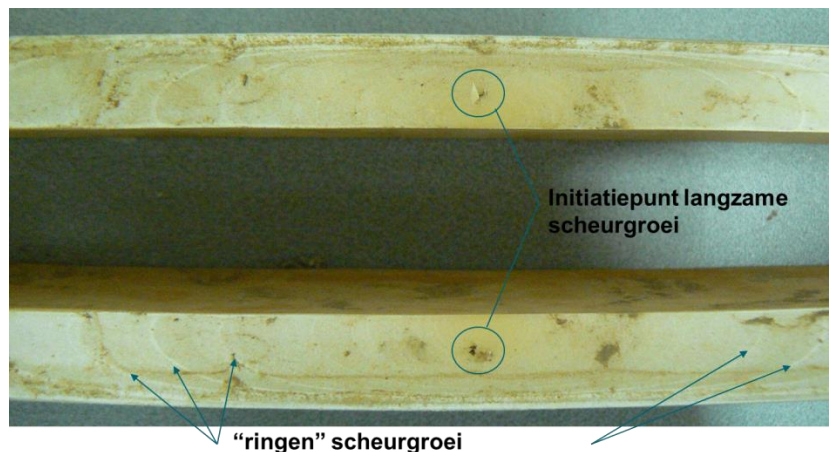
Bij hoge longitudinale spanningen in een leiding wordt de leiding ook in tangentiële richting zwaarder belast.

4.6 Onderscheid in het type van falen

Het proces tot falen van PVC hangt sterk samen met de grootte van de spanning en de duur dat deze optreedt. De tijd tot falen onder "normale" spanningscondities hangt sterk af van de weerstand tegen langzame scheurgroei. De gevonden waarden voor deze parameter kennen een zeer grote spreiding waarbij opgemerkt wordt dat een groot deel van de onderzoeken is uitgevoerd op schademateriaal (rode en gele lijnen in figuur 6). Breuken in PVC leidingen komen voor in verschillende vormen die elk een eigen oorzaak kunnen hebben in de combinatie van belasting en materiaaleigenschappen. In de beschrijving van de verschillende vormen van falen wordt niet ingegaan op de oorzaak "derden". Deze vorm van falen ligt slechts voor een deel aan het toegepaste materiaal.

4.6.1 Beperkte breuk (scheurvorming) in buisdeel

Bij een gemiddelde spanning in het buismateriaal bestaan lokaal spanningspieken die de gemiddelde spanning te boven gaan vanwege ongelijkmatigheden in het materiaal. Dit kan ontstaan rond insluitingen (vervuiling van het basismateriaal), verkoolde deeltjes in het PVC, verglaasde deeltjes in het PVC, grotere kristallen in het PVC. De verhoogde lokale spanningen kunnen de breukspanning overschrijden waardoor de spanning in het materiaal lokaal nog hoger wordt. Het proces verloopt langzaam en in het patroon rond een dergelijk initiatiepunt zijn de ringen van de scheurgroei soms zichtbaar, zie figuur 14.



Figuur 14 Initiatiepunt breuk in PVC leiding met ringen van scheurgroei. De buiswand is voor deze foto over de breuk opgevouwen, de buitenkant van de buiswand is dus onder en boven zichtbaar.

Na verloop van tijd bereikt de breuk de volledige wanddikte en ontstaat er een lek in de buis. De lengte van dit type scheuren in de buis is in de orde van grootte van de buisdiameter. De looptijd van dergelijke lekkages kan aanzienlijk zijn, een en ander hangt sterk samen met de ligging van de buis en de volumestroom door het lek. In figuur 15 is een breuk in een \varnothing 500 mm leiding weergegeven waar de randen geërodeerd zijn gedurende de looptijd van het lek.



Figuur 15 Breuk met een lange looptijd in \varnothing 500 mm PVC leiding, de lengte van de breuk bedraagt ongeveer 350 mm. De buitenzijde van de buis is gefotografeerd.

Als de storingsfrequentie als gevolg van deeltjes in de matrix laag en de vervolgschade niet te hoog is, kan besloten worden om de storingen af te wachten en de buisdelen bij storing te vervangen. De kwaliteit van de totale leiding neemt toe bij het vervangen van de buisdelen met deeltjes.

4.6.2 Optreden RCP

Als de scheurvorming in de buiswand niet gestopt wordt (er treedt geen "arrest" op), scheurt de buis over de volledige lengte open, dit verschijnsel wordt Rapid Crack Propagation (RCP) genoemd. Het verschijnsel RCP kent een kritische waterdruk waarbij het verschijnsel zich kan voordoen. Deze druk is afhankelijk de combinatie van de diameter van de buis, de wanddikte, de restspanning in het materiaal, temperatuur en een initiatie van de breuk in het materiaal. Op basis van de berekeningen van de kritische waterdrukken voor RCP is in de diameter \varnothing 315 mm een drukklasse 1 MPa benodigd bij werkdrukken rond de 30 mwk, en in de diameter \varnothing 110 mm is een drukklasse 0,63 voldoende [4]. RCP zal zich dus vooral in de grotere diameters voordoen. Het is niet zo dat RCP zal optreden boven de genoemde kritische waterdruk maar onder de kritische druk treedt het niet op.

Het ligt aan de ligging van de leiding en de omgeving of een breuk over de volledige lengte van de leiding tot een probleem leidt of niet. De uittredende hoeveelheid water is bij RCP hoog maar de looptijd is kort. Het lek wordt direct ontdekt.

Hoewel de wijze van falen duidelijk onderscheid geeft tussen RCP en een korte scheurvorming is het zonder nader onderzoek naar de materiaaleigenschappen van bestaande leidingen niet mogelijk om RCP uit te sluiten. In het ontwerp kan hiermee rekening gehouden worden.

4.6.3 Breuk in of nabij koppeling

Bij aanleg met steekmoffen is een bepaalde hoekverdraaiing mogelijk in de spie-mof verbinding. Afhankelijk van de uitvoeringswijze van de verbindingen (enkele of dubbele mof per verbinding) bedraagt de hoekverdraaiing 3° of 6° . Bij verdraaiing boven deze waarde ontstaat er contact tussen de spie en de mof en ontstaat een spanning in het materiaal ter plaatse van dit contact. Deze spanning loopt op met de hoekverdraaiing en kan leiden tot breuk in de mof of breuk in de leiding ter plaatse van de mof. Dit type breuken wordt

gevonden in gebieden met een hoge zetting. Door de hoekverdraaiingen in een leiding ter plaatse van de verbinding te meten wordt het proces gemonitord en kan, indien noodzakelijk, ingegrepen worden [1].

5 Kennisregels PVC

5.1 Algemeen

Sinds 1955 wordt PVC op grote schaal toegepast als buismateriaal in de drinkwaterindustrie (gemiddeld 1000 km per jaar). Sindsdien zijn productiemethoden veranderd en verbeterd. Sinds 1966 bestaan er eisen voor deze toepassing en ook deze zijn steeds verder ontwikkeld. Uit de verschillende onderzoeken naar de eigenschappen en het gedrag van dit materiaal komen een aantal kennisregels naar voren waarmee PVC waterleidingbuizen globaal beoordeeld kunnen worden. Gezien de spreiding in eigenschappen en liggingssomstandigheden van PVC leidingen is een voorspelling van het gedrag van deze leidingen niet eenduidig. Gekozen is voor twee benaderingen waarin de kans op falen (hoog, gemiddeld of laag) bekeken wordt.

- Een proactieve benadering waarin de faalkans globaal benaderd wordt;
- Een reactieve benadering na breuk van een leiding waarin gekeken wordt naar de meest waarschijnlijke oorzaak en de kans op herhaling in die leiding globaal benaderd wordt.

Omdat het falen van PVC leidingen een combinatie is van de optredende spanningen in het materiaal en de aanwezige materiaaleigenschappen is het bepalen hiervan de rode draad door deze benaderingen.

5.2 Proactieve benadering

Voor een proactieve benadering van de faalkans van een PVC buis wordt de volgende werkwijze gevolgd:

1. Bereken of schat de optredende spanning in de te beschouwen PVC leiding; Hiervoor kan een eenvoudige berekening gebruikt worden op basis van beperkt aantal variabelen (zie tabel 2) of gebruik maken van een spanningsmodel als Comsima.
2. Bepaal de weerstand tegen langzame scheurgroei (WLS); De WLS is geen snelle eenvoudige bepaling. Over het algemeen wordt deze bepaald voor leidingen waar een absolute uitspraak over de conditie belangrijk is. De WLS kan geschat worden op basis van het aanlegjaar / productiejaar waarbij de periode < 1980 beschouwd kan worden als mindere kwaliteit. Fysische veroudering van het materiaal veroorzaakt een verlaging van de WLS, fysische veroudering is nog niet eenvoudig meetbaar. De eis voor het materiaal (sterkte 1 uur = 42 MPa, 100 uur = 35 MPa en 50 jaar = 25 MPa) is een uitgangspunt voor de beschouwing maar de gemeten waarden geven grote afwijkingen ten opzichte van de eis.
3. Bepaal of de combinatie van materiaalspanning, duur van de spanning (leeftijd leiding) en de WLS tot een verlaagde veiligheid tegen bezwijken op de leiding leidt of niet.
4. Bepaal de kans op RCP op basis van de buiseigenschappen.

Op basis van de hierboven beschreven procedure kan ingeschat worden wat het risico op falen is. Vanwege de grote onzekerheden in de gegevens is het zinnig om hier niet verder te gaan dan een uitspraak over een groot risico, gemiddeld risico of klein risico.

5.3 Reactieve benadering

Voor een reactieve benadering van de faalkans van een PVC buis wordt de werkwijze als bij een proactieve benadering gevolgd met het opgetreden faalmechanisme als extra aanwezige informatie.

Bij het falen van een PVC buis is de weerstand tegen langzame scheurgroei te laag geweest voor de heersende spanningen. Uit een analyse van de heersende spanningen en de WLS (te bepalen op het schademateriaal) volgt de verklaring voor het falen. De WLS kan laag zijn of de spanningen hoog. Als de combinatie van spanningen en WLS niet klopt met het opgetreden falen, verdient het aanbeveling om de liggingssituatie in ogenschouw te nemen. Mogelijk zijn er factoren die over het hoofd gezien zijn als zettingsverschillen of belastingen die niet in de spanningsberekening meegenomen zijn.

Op een gefaalde buis kan ook visueel onderzoek op het breukvlak plaatsvinden waarmee de aanwezigheid van deeltjes in het materiaal in het initiatiepunt van de breuk vastgesteld kan worden. Deeltjes in materiaal kunnen een breuk veroorzaken bij relatief lage spanningen vanwege de spanningsconcentraties rond de deeltjes.

Indien de scheur kort is, is RCP niet opgetreden. Het gevaar voor RCP kan in een degelijke situatie wel aanwezig zijn en een analyse van de situatie voor RCP kan zinvol zijn. Als er een scheur over de volledige lengte van het buisdeel is opgetreden is RCP opgetreden. Dit is in de rest van leiding ook mogelijk indien geen verandering van buiseigenschappen aanwezig is.

5.4 Storingsfrequentie

De beoordeling van een PVC leiding hangt sterk samen met de storingsfrequentie en het optredende bezwijkmechanisme. Het optreden van RCP heeft een groter effect op de omgeving dan een korte scheur. Een leiding waarin RCP optreedt zal eerder vervangen worden bij een gelijke storingsfrequentie dan een leiding waar alleen korte scheurtjes in optreden. Een maximum storingsfrequentie voor tot vervangen overgegaan wordt is dan ook afhankelijk van de plaats en de vorm van bezwijken.

Gezien het verloop van de WLS van PVC (afnemende sterkte in de loop van de tijd) zal een leiding die onder een gelijkmatige belasting ligt steeds frequenter gaan storen en is het zinvol om bij een relatief lage storingsfrequentie de leiding te gaan vervangen. Als deeltjes in het materiaal de oorzaak zijn van het storen en de vervolgschade niet te hoog is, kan besloten worden om de storingen af te wachten en de buisdelen bij storing te vervangen.

5.5 Samenvatting PVC leidingen

Bij het beheer van PVC drinkwaterleidingen kunnen de waterleidingbedrijven de volgende acties uitvoeren:

1. Bepaal de materiaalspanningen onder verschillende omstandigheden van de aanwezige verschillende PVC leidingen met COMSIMA;
2. Voer exitbeoordelingen uit op PVC buisdelen die vrijkomen bij schade en inbouwen op de parameters DCMT / DSC, WLS, RCP;
3. Breidt de Ustoregegevens uit met de leidingparameters drukklasse / wanddikte, optredende inwendige druk, diepteligging, aanwezigheid van verkeersbelasting;
4. Registreer de batches van de aangelegde leidingen (stempels) in het LIS (nieuw en bij exitbeoordelingen);
5. Leg de ligging van de verbindingen in de leiding vast met de Index Joint Condition (IJC) bij aanleg en inspectie;
6. Leg bij de ingangscntrole de ingangssterte vast (niet alleen het voldoen aan de eis).

6 Witte vlekken

In het uitgevoerde onderzoek zijn nog een aantal witte vlekken waar nader onderzoek voor noodzakelijk is of registratie nog niet voldoende is. De belangrijkste zijn:

- Veroudering van PVC komt voor. Uit de resultaten van het materiaalonderzoek blijkt de langeduursterkte van het materiaal te verminderen ten opzichte van de eisen die bij productie hieraan gesteld zijn. De spreiding in de mate van de geëxtrapolerde waarden veroudering is groot. Er is geen algemene relatie gevonden met het resultaat van de DCMT test.
Bij de TU Twente is gewerkt aan een methode om fysische veroudering van dit type materiaal met ultrasone metingen te meten [5]. Aanbevolen wordt om deze methode te valideren op uitgenomen buisdelen en / of schademateriaal waarvan de WLS bekend is. In het volgende hoofdstuk wordt een eerste poging hiertoe beschreven, die is uitgevoerd in 2017. Vooralsnog is de methode echter niet bruikbaar gebleken en is doorontwikkeling en vervolgens validatie aan te raden.
- Op basis van een eenvoudige benadering van de tangentiële spanningen in de leiding komen hoge spanningen voor in de toegepaste drukklassen (0,63 en 0,75 MPa). In combinatie met de soms lage weerstand tegen langzame scheurgroei neemt de levensduur af en de faalkans toe. Een analyse van de storingsgegevens is nog niet mogelijk omdat de drukklasse van de leidingen vaak niet bekend zijn in het LIS opgenomen is. Aanbevolen wordt om de benodigde gegevens in het LIS op te nemen
- De veroudering van het materiaal lijkt verbonden te zijn met productiebatches van de buizen. De kenmerken van deze batches zijn op de buis aangebracht waardoor registratie hiervan mogelijk is in het registratiesysteem van het waterleidingbedrijf. Hiermee wordt in toekomst een gerichte aanpak op buizen van verschillende kwaliteiten mogelijk. Aanbevolen wordt om deze informatie over te gaan nemen in het LIS op het moment dat deze beschikbaar komt, bijv. bij inbouwingen en storingen.
- De DCMT test geeft een kwalitatieve uitslag van de gatering van het materiaal bij de temperatuur waarbij deze uitgevoerd wordt. Door de test bij twee verschillende temperaturen uit te voeren, bij ondergatering bij een lagere en bij overgatering bij een hogere temperatuur wordt een meer kwantitatieve uitslag verkregen. De voordelen van de DCMT test (groot test oppervlak en een goed inzicht in de spreiding over het geteste buisdeel) blijft hierbij behouden.
DSC geeft een kwantitatieve uitslag en hiermee ook een maat voor een eventuele overgatering die niet met een eenvoudige DCMT test naar voren komt. DSC wordt uitgevoerd op een klein (enkele mm³) deel waardoor een enkel monster niet volstaat om de spreiding in gatering over het buisdeel te leren kennen, meerdere monsters uit een buisdeel zijn noodzakelijk.

7 Validatie van de noncolinear wave mixing techniek met proefstukken uit het veld

7.1 Inleiding

De verzamelde resultaten van metingen van de weerstand tegen langzame scheurgroei (WLS) in paragraaf 3.3 van dit rapport vertonen een grote spreiding in zowel de bezwijkspanning als de helling van de WLS curve. Daarbij valt op dat veel van de gemeten curven de norm overschrijden (zie Figuur 6). Dit suggereert dat de WLS van de buizen in de loop der tijd is verslechterd, aangenomen dat de buizen bij installatie aan de norm voldeden. De WLS bepaalt de snelheid van de mechanische veroudering (scheurvorming) van buizen. Om een goede inschatting van de technische levensduur van buizen in het veld te kunnen maken is het essentieel om deze verslechtering te kunnen verklaren, beschrijven en vooral ook te bepalen.

Bij experimenten van Boersma en Breen [Boersma en Breen, 2005] werd een met de spreiding vergelijkbare verandering van de WLS gezien na in het laboratorium versnelde fysische veroudering. Fysische veroudering ('physical aging' of ook wel 'volume relaxation') is een verouderingsproces dat, parallel aan mechanische veroudering, optreedt in PVC. Dit proces is universeel in onder andere glasachtige polymeren zoals PVC. Door herschikking van de moleculen treedt veelal verdichting op en wordt het materiaal onder andere stijver, maar ook brosser. Ook kan hierdoor de hechting tussen polymeren en toevoegstoffen veranderen. Toevoegstoffen kunnen doorreageren. De stabilisator reageert met zoutzuur waarbij andere (geneutraliseerde) verbindingen ontstaan. Toegevoegd krijt kan eveneens reageren met zoutzuur. Het gevolg is dat het verouderde materiaal minder goed in staat is om lokale plastische vervorming te spreiden, waardoor het bevattelijker wordt voor scheurgroei. Het verloop van fysische veroudering is sterk afhankelijk van de temperatuur en van de tijd die verstreken is sinds het materiaal in de glastoestand kwam. De fysische toestand van PVC buizen is daarom nauw verweven met de koelingsomstandigheden tijdens het extrusieproces. Kennis van de initiële mate van fysische veroudering, verdeling van toegevoegde deeltjes, de hechting van deze deeltjes en de chemische veranderingen van deze deeltjes is cruciaal om de mate van verdere veroudering tijdens de verdere gebruiksperiode af te schatten. Het ontbreken van deze kennis bemoeilijkt op dit moment een modelmatige schatting op basis van bekende leidingparameters. Om die reden zijn metingen van de daadwerkelijke toestand bij de bepaling van de technische restlevensduur gewenst.

De verschillende technieken die op dit moment beschikbaar zijn om de mate van fysische veroudering te bepalen hebben als nadeel dat ze de eigenschappen zeer lokaal meten (bijvoorbeeld micro-indentatie [Visser, 2009]) terwijl eigenschappen over de wanddikte en buislangte kunnen variëren [Boersma en Breen, 2005]. Daarnaast is het verzamelen van meetsamples en/of het uitvoeren van de testen ook vaak inherent destructief (bijvoorbeeld differential scanning calorimetrie of mechanische beproeving [Boersma en Breen, 2005]), waardoor de tests vooral geschikt zijn voor exitbeoordelingen. Voor technische restlevensduurbepalingen is een in-line, non destructieve meettechniek die grote delen van een leiding kan doormeten ideaal. In Wetsus-verband is hiervoor een ultrasoon inspectiemethode in ontwikkeling. De opstelling is gebaseerd op een geavanceerde

akoestische techniek: noncollinear wave mixing (NCWM). Eerder werd aan de universiteit van Twente in het lab de gevoeligheid van deze techniek voor de mate van fysische veroudering aangetoond [Demcenko *et al.*, 2012]. Hoewel Demcenko een destructieve samplmethode gebruikte bij het aantonen van deze gevoeligheid, is de meettechniek in principe inherent non destructief. Anno 2017 is de mechanische uitvoerbaarheid en reproduceerbaarheid in ontwikkeling [Hernandez Delgadillo, 2017].

Dit hoofdstuk beschrijft een studie waarin NCWM metingen zijn uitgevoerd op samples van leidingen waarop eerder de reguliere metingen van een exitbeoordeling zijn uitgevoerd (zie ook paragraaf 3.3). Uit de vergelijking van de resultaten zal blijken of de resultaten van de NCWM metingen overeenkomen met de eerder gemeten variatie in WLS. Zo wordt meer inzicht verkregen in de relatie tussen fysische veroudering en WLS. Bovendien wordt zo meer inzicht verkregen in de potentie van NCWM als techniek voor het non-destructief, in-line en over grotere lengte meten van de toestand van PVC leidingen.

7.2 Proefstukken

Proefstukken zijn verzameld uit het restmateriaal van verschillende buizen waarop KWR exitbeoordelingen heeft uitgevoerd voor de drinkwaterbedrijven sinds 2007. Daarnaast werd een proefstuk van 'nieuw' materiaal – uit een buis van 2017 die nooit in gebruik genomen is – in de verzameling opgenomen om te dienen als referentie. Proefstukken en restmateriaal zijn op willekeurige volgorde gemarkeerd met geanonimiseerde codes om terug te kunnen vinden welk proefstuk bij welke exitbeoordeling hoort. De verzameling proefstukken uit de exitbeoordelingen (zie ook Figuur 4 t/m Figuur 9 in dit rapport) bevatte:

- leeftijden variërend van 23 tot 46 jaar;
- bezwijkspanningen variërend van 44.5 tot 58.9 MPa
- WLS variërend van -2.07 tot -4.80 MPa per decade
- wanddiktes variëren van 8 tot 22 mm
- zowel ondergeleerde als niet ondergeleerde proefstukken

7.3 Noncollinear Wave Mixing

Bij het toepassen van NCWM op een sample worden twee geluidsgolven met verschillende frequenties het sample ingezonden onder verschillende hoeken. Daar waar de golven elkaar kruisen, kan een interactie tussen de golven optreden waaruit een derde golf ontstaat: de resulterende golf. De frequentie van de resulterende golf en de hoek waaronder deze zal voortbewegen zijn afhankelijk van de eigenschappen van de originele golven, en kunnen gestuurd worden door de eigenschappen van de originele golven nauwkeurig op elkaar af te stemmen. Daarbij is het een essentieel gegeven voor NCWM dat de frequentie en richting van de resulterende golf verschillend zijn van die van de originele golven. Het signaal van de resulterende golf is daardoor instrumenteel relatief makkelijk op te vangen en te isoleren van de signalen van de originele golven. Dit levert een meetbaar signaal op dat onder andere gevoelig is voor minieme variaties in elastische eigenschappen, die kunnen worden veroorzaakt door, onder andere, fysische veroudering.

7.4 Meetresultaten

Tabel 3 bevat de resultaten van de akoestische metingen die bij Wetsus op de proefstukken zijn uitgevoerd. 6 van de 22 proefstukken bleken te kort (buis uitsnede met een lengte van <4 cm in longitudinale richting) om met de opstelling doorgemeten te kunnen worden. Voor de overige 16 proefstukken werd de geluidssnelheid in het materiaal gemeten, en werd de amplitude van de (uit NCWM) resulterende golf bepaald. De amplituden van de resulterende golf zijn genormaliseerd op het maximale signaal in de dataset.

Wat betreft de geluidssnelheidsmetingen is een ruwe tweedeling in de dataset zichtbaar. Er lijkt een systematisch verschil te zijn tussen de geluidssnelheden in samples van buizen met een wanddikte rond de 10 mm enerzijds, en die in samples van buizen met een wanddikte rond de 20 mm anderzijds. Verschillen in de geluidssnelheden komen door een verschil in dichtheid, compressibiliteit of elastische eigenschappen, en wijzen daarmee op een verschil in samenstelling (bijvoorbeeld toeslagstoffen, ketenlengte) of structuur (bijvoorbeeld gatering) van de materialen. Vergelijking met de data uit de exitbeoordelingen wijst uit dat in beide groepen zowel ondergegeleerde als niet ondergegeleerde samples voorkomen, dus de tweedelingen kan niet met de geleringsgraad worden verklaard. Andere informatie over mogelijk verschillen in bulkeigenschappen van het materiaal die dit verschil zouden kunnen verklaren is vanuit de exitbeoordelingen niet beschikbaar.

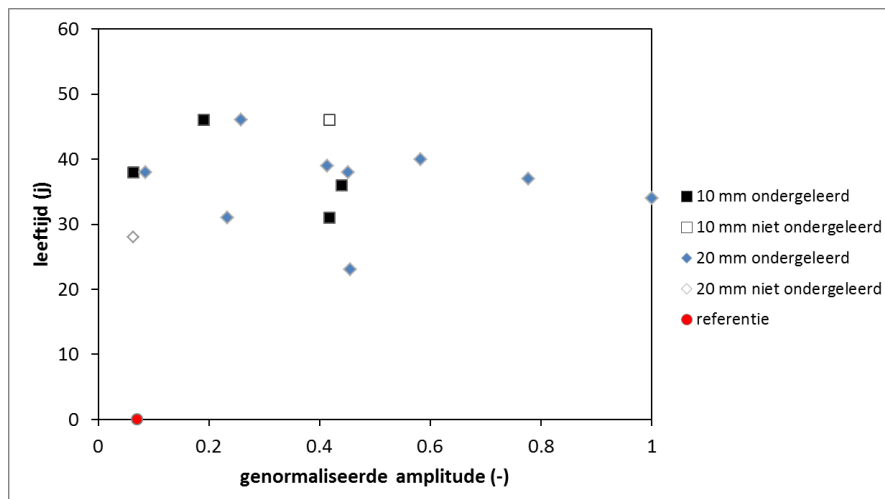
Tabel 3. Meetresultaten NCWM

sample code	wanddikte (mm)	longitudinale geluidssnelheid (m/s)	transversale geluidssnelheid (m/s)	maximale amplitude, gegeneerd signaal (a.e.)	maximale amplitude, gegeneerd frequentie spectrum (a.e.)
502	15.5	0	0	0	0
503	10.7	0	0	0	0
507	12.6	0	0	0	0
512	9.1	0	0	0	0
513	7.8	0	0	0	0
516	13.1	0	0	0	0
514	8	2313	1455	0.2348	0.0634
517	12.3	2314	1239	0.3301	0.4184
511	9.6	2317	1312	0.4616	0.4396
519	12.6	2319	1254	0.205	0.191
515	12.1	2329	1221	0.5056	0.4173
522	13	2347	1147	0.1445	0.0771
518	22	3023	1051	0.3369	0.4514
506	21.1	3074	941	0.7486	0.4561
520	21.1	3077	985	1	1
505	19.7	3111	932	0.6985	0.7769
509	20.3	3140	988	0.5588	0.5829
501	19.8	3157	1016.9	0.6968	0.4146
504	18.7	3182	1153.4	0.4106	0.2333
510	18.1	3190	993	0.1815	0.0855
508	17.2	3307	910	0.4536	0.5587
521	19.9	3591	891	0.294	0.2588

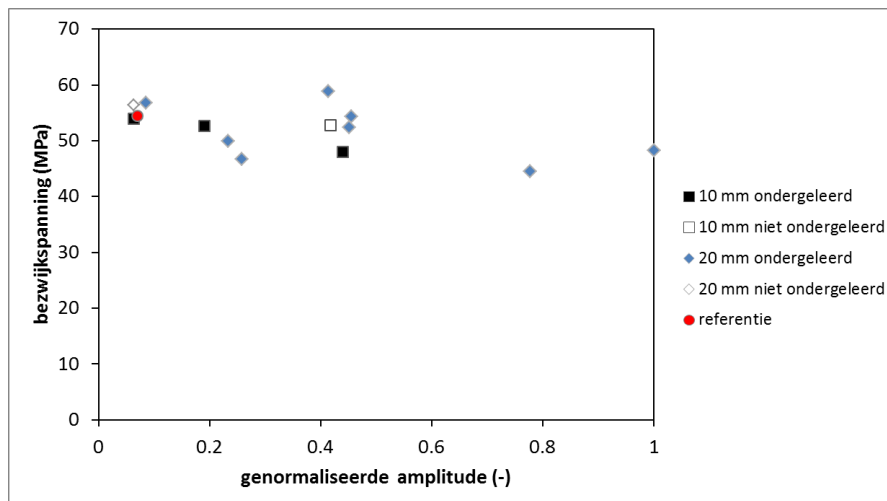
Er is een duidelijk meetbaar verschil in de amplituden van de uit NCWM resulterende golf voor verschillende samples: het sterkste signaal is meer dan 15 keer sterker dan het zwakste signaal. De meetwaarden zijn echter moeilijk te interpreteren. Uit het initiële werk van Demcenko [Demcenko *et al.*, 2012] is gebleken dat fysische veroudering een toename in het NCWM signaal tot gevolg heeft. Het signaal uit één sample is echter ook afhankelijk van veel verschillende eigenschappen, zoals chemische samenstelling, de lengte van polymeerketens,

vulstoffen en geleringsgraad [Hernandez Delgadillo, 2017]. De gemeten volgorde van signaalsterkten kan hierdoor niet teruggevoerd worden op één enkele verklarende variabele.

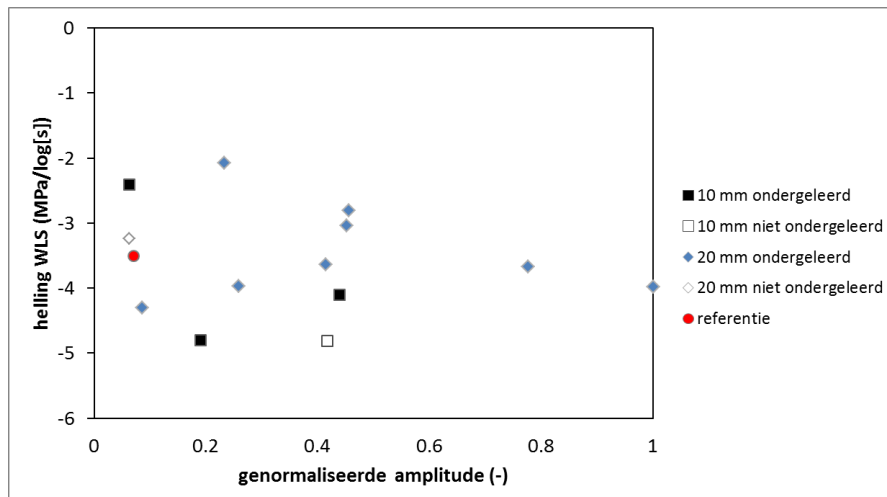
Dit blijkt ook uit vergelijking van de NCWM meet data met de verschillende parameters die tijdens de exitbeoordelingen zijn bepaald. Figuur 16 t/m Figuur 18 tonen de relatie tussen het NCWM signaal en respectievelijk de leeftijd, bezwijkspanning en de WLS van de samples. De data is steeds uitgesplitst op de gelering en de wanddikte (overeenkomstig met het verschil in geluidssnelheid, zie Tabel 3) in de samples, omdat dit eigenschappen zijn waarvan bekend is dat ze het NCWM signaal beïnvloeden. Metingen van de WLS en bezwijkspanning van het referentiesample zijn niet beschikbaar; daarom zijn hiervoor de waarden van de norm genomen [Boersma en Breen, 2005]. Er mag een positieve correlatie verwacht worden tussen mate van fysieke veroudering, enerzijds, en zowel de leeftijd als de bezwijkspanning van het materiaal, anderzijds [Boersma en Breen, 2005]. Een dergelijke relatie is echter niet uit de data in Figuur 16 en Figuur 17 op te maken. Dit komt waarschijnlijk doordat de relatie tussen de mate van fysieke veroudering en het NCWM signaal overstemd wordt door de invloed van de andere materiaalparameters. De relatie met leeftijd wordt daarnaast waarschijnlijk ook verstoord door een onbekende variatie in de initiële mate van fysieke veroudering bij installatie van de samples.



Figuur 16. De relatie tussen de amplitude van de uit NCWM resulterend golf en de leeftijden van de samples.



Figuur 17. De relatie tussen de amplitude van de uit NCWM resulterend golf en de bezwijkspanningen van de samples. De referentie geeft de bezwijkspanning weer die hoort bij de norm voor WLS.



Figuur 18. De relatie tussen de amplitude van de uit NCWM resulterend golf en de helling van de WLS van de samples. De referentie geeft de helling weer die hoort bij de norm voor WLS.

7.5 Discussie en aanbevelingen

De NCWM opstelling kan gebruikt worden om PVC samples non destructief door te meten, maar kan daarmee op dit moment niet genoeg informatie verzamelen om interpretatie van het meetresultaat mogelijk te maken. Een op zichzelf staande meting is daarom nog niet toereikend om specifieke materiaaleigenschappen te achterhalen. Om dit te bereiken is meer onderzoek nodig naar een manier om de invloeden van de verschillende individuele materiaaleigenschappen op het NCWM signaal van elkaar te isoleren.

Demcenko kon de techniek gebruiken om fysische veroudering te meten door samples door te meten, daarna te verjongen en vervolgens nog eens door te meten. Het verjongen van de samples levert een referentiemeting, maar maakt die aanpak destructief. Om de NCWM techniek tot in-line inspectietechniek voor veroudering te kunnen ontwikkelen moet deze gekalibreerd worden op de andere parameters die het signaal beïnvloeden. Daarvoor is meer inzicht in de gevoeligheid van de techniek voor materiaaleigenschappen nodig. Om meer inzicht te verkrijgen in de toepasbaarheid van NCWM moeten representatieve proefstukken

worden vervaardigd en doorgemeten. De te onderzoeken aspecten waarop de gevoeligheid van NCWM moet worden getoetst zijn - naast fysieke veroudering - onder andere:

- verdeling en samenstelling van toevoegstoffen;
- chemische verandering van toevoegstoffen;
- onthechting van toevoegstoffen in de PVC matrix;
- geleergraad en kristallisatie van PVC;
- inwendige en oriëntatiespanningen.

Het gebruik van een gekalibreerde opstelling zal vervolgens de lokale waarden van die parameters voor de doorgemeten leiding vereisen. De kennis van de samples in de huidige studie die is verkregen uit de eerdere exitbeoordelingen (WLS, gelering uit DCMT) was niet toereikend. In een in-line toepassing die is bedoeld voor grote hoeveelheden metingen zal die kennis waarschijnlijk met gelijktijdige, ondersteunende metingen moeten worden verkregen. De vraag welke methoden daarvoor moeten worden gebruikt valt hier buiten de scope; maar een veel uitgebreider ontwikkelingstraject om deze vraag te beantwoorden is aan te raden. Daarnaast is het aan te raden om een bibliotheek van grondiger gekarakteriseerde veldsamples op te bouwen om de validatie en ontwikkeling van deze en andere inspectietechnieken te ondersteunen.

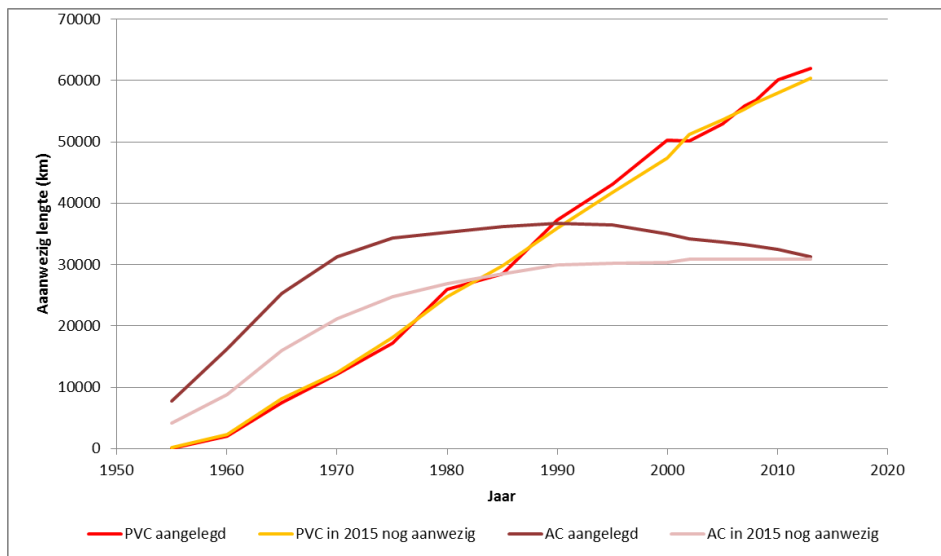
De grote gevoeligheid van het NCWM signaal voor verschillende materiaaleigenschappen biedt ook extra kansen. Volgens Demcenko zou het signaal bijvoorbeeld ook gevoelig zijn voor de spanning in het materiaal. Daarmee zou deze techniek ook de mogelijkheid kunnen bieden om spanningsprofielen van ingesloten ringspanning in de wand van PVC-buizen te kwantificeren. Het meten van die eigenschap van buizen is belangrijk om een volledig beeld van de belasting van een buis te krijgen. Deze eigenschap is ook mede bepalend voor het al dan niet ontwaarden van een beschadiging in RCP [Breen en Scholten, 2013]. Het is aan te raden om verder te onderzoeken of deze techniek hiervoor zou kunnen worden aangewend.

8 Toestand huidige leidingnet PVC

8.1 PVC in het waterleidingnet

Uit de Vewin statistiek is bekend welke hoeveelheden van een materiaal (PVC, AC, GGJ) er in een bepaald jaar aanwezig waren in het Nederlandse distributienet, zie figuur 19 (rode lijn). Uit de verzameling leidinggegevens in Ustore plus Vitens (ongeveer 90% van het totale leidingnet) en een extrapolatie naar de volledige lengte waterleiding in Nederland is de lijn gegenereerd van de leidinglengten die nog in gebruik zijn in het jaar 2013 aangelegd in de zichtjaren van de Vewin statistiek, zie figuur 19 (gele lijn). In de grafiek is naast PVC het materiaal AC opgenomen waarmee het effect van saneren van een materiaal duidelijk zichtbaar is. De lijnen PVC slingeren rond elkaar. Dit betekent dat de data enige mate van onnauwkeurigheid kent. De lijn "PVC in 2015 nog aanwezig" is waarschijnlijk de meest nauwkeurige omdat deze direct uit het LIS van de waterleidingbedrijven komt (2015). In de cijfers van de lijn "PVC aangelegd" is tot het jaar 2000 ook het aandeel PE meegenomen door Vewin, na het jaar 2000 is het PE niet meer aanwezig in de PVC cijfers. De knik in de lijn op het jaar 2000 vindt hier zijn oorzaak. In de cijfers uit de verzamelde LIS gegevens van de waterleidingbedrijven is PE niet aanwezig. Het materiaal "verstrekt PVC" is in de Vewin cijfers niet expliciet opgenomen, deze hoeveelheid wisselt tussen "PVC" en "overig". Dit is hoogstwaarschijnlijk ook de oorzaak dat de hoeveelheid aangelegd PVC aan het eind van de grafiek zoveel afwijkt van de nog aanwezige hoeveelheid PVC. Uit de geregistreerde hoeveelheden "verstrekt PVC" volgt een sterke toename van dit materiaal in de periode 2005 - 2010.

Uit de lijnen van PVC blijkt dat er geen duidelijke periode aanwijsbaar is waarbinnen PVC leidingen gesaneerd worden door de waterleidingbedrijven. De periode waarbinnen de kwaliteit van de PVC leidingen een grotere spreiding is gaan vertonen (begin jaren '70) komt niet naar voren als periode waar een grotere sanering van PVC leidingen is uitgevoerd. Voor AC geldt dat de gesaneerde lengten duidelijk zichtbaar zijn in de grafiek. De cijfers voor PVC en AC hebben gelijke bronnen, namelijk Vewin statistieken en LIS.



Figuur 19 Aanleg en aanwezigheid van PVC en AC in het drinkwaternet in Nederland voor de periode 1955 - 2013. Het verschil tussen de aanleg en de nog aanwezige leidinglengte is het deel dat verwijderd is uit het aanlegjaar. In het deel AC is de sanering duidelijke zichtbaar. In het deel PVC is geen significante afname van de aangelegde lengte zichtbaar.

8.2 Vervallen leidingen in het huidige net

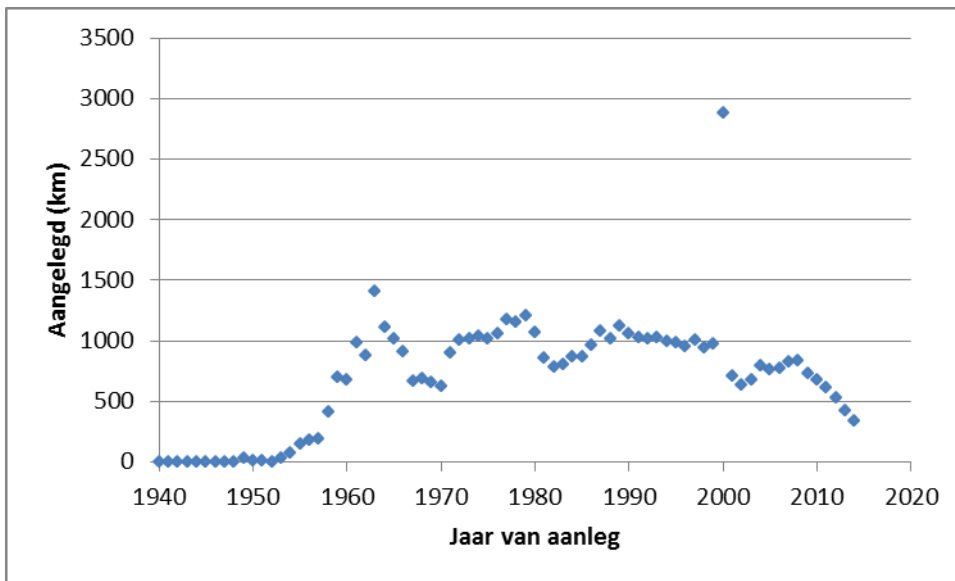
Om een gedetailleerder inzicht te krijgen in de vervallen hoeveelheden PVC en de mogelijke afhankelijkheid van een aanleg- of fabricageperiode is een inventarisatie gemaakt van de hoeveelheden vervallen PVC leidingen per aanlegjaar. In deze inventarisatie is ongeveer 90 % van het volledige PVC bestand vertegenwoordigd (8 bedrijven). Gevraagd is naar de volgende gegevens per gesaneerde PVC leidingen:

- lengte;
- diameter;
- aanlegjaar;
- saneringsjaar;
- drukklasse of wanddikte (indien bekend);
- verbindingstype (indien bekend, steekmof, trekvast koppeling, gelijmd, etc.);
- fabrikant (indien bekend);
- reden voor sanering.

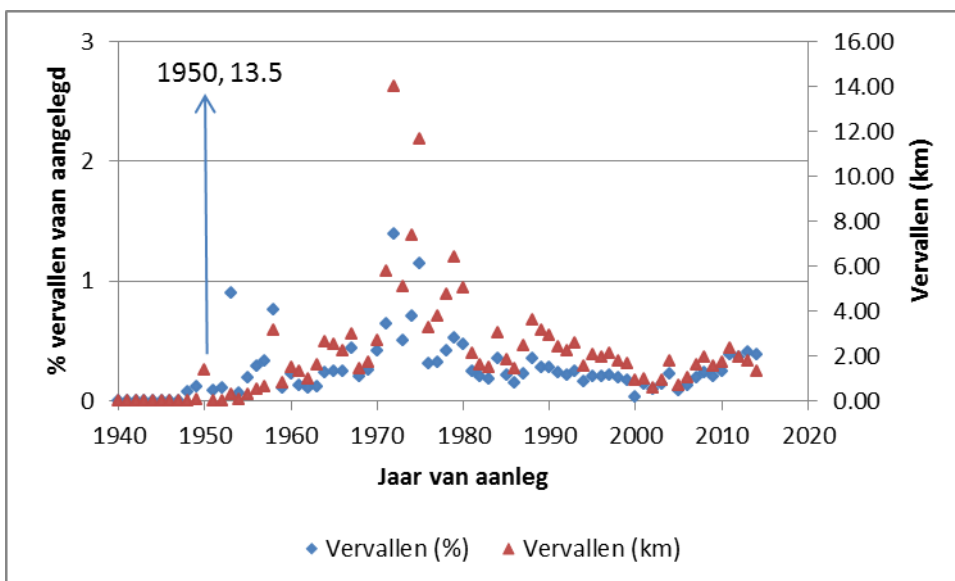
Van de gevraagde gegevens zijn alleen de lengte, het aanlegjaar en vervangingsjaar goed bekend. Diameters van vervangen leidingen zijn wel bekend als het om grote projecten gaat. Van de kleine projecten is dit meestal niet bekend. Drukklasse, verbindingstype en fabrikant zijn van de vervangen leidingen niet bekend. Omdat dit over het algemeen ook geldt voor de leidingen die niet vervangen worden is dit geen probleem. De mogelijkheid om op deze items te selecteren bestaat simpelweg niet. In de storingsregistratie is het een item om wel zoveel mogelijk te registreren omdat hiermee de storing beter begrepen kan worden. Een storing in een buis van drukklasse 0,63 MPa is bij gelijke omgevingsomstandigheden van een andere orde dan een storing in een buis van een drukklasse 1 MPa.

In figuur 20 zijn de hoeveelheden aangelegde leidingen per jaar weergegeven van de bedrijven die de inventarisatie hebben kunnen maken. In figuur 21 is weergegeven hoeveel procent in de jaren 2014 -2015 - 2016 is vervangen. Uit de toegevoegde informatie blijken

werkzaamheden van derden en optredende storingen de belangrijkste redenen voor vervanging te zijn.



Figuur 20 Aangelegd PVC per jaar uit de inventarisatie van 8 bedrijven (het punt 2001 is ontstaan uit een, door het waterleidingbedrijf uitgevoerde, correctie van de hoeveelheid PVC met een onbekend aanlegjaar in het LIS)



Figuur 21 Vervallen lengte PVC leiding van de aanwezige lengte per aanlegjaar gedurende de periode van inventarisatie (2014 - 2015 - 2016) als percentage en absolute lengte.

Uit de gegevens komt de periode 1970 - 1975 naar voren als een aanlegperiode waar een verhoogde saneringsactiviteit heeft plaatsgevonden zowel in absolute lengte als in percentages. In 1972 is in de periode 2014 - 2015 - 2016 elk jaar ongeveer 0,5% vervangen. In de jaren 60 van de vorige eeuw ligt dit percentage op 0,1 - 0,2%.

Na 1980 zakt de vervanging naar een percentage van minder dan 0,1% per jaar, dit betreft voornamelijk reconstructies. Tussen de bedrijven is in de betreffende periode een grote spreiding aanwezig in het vervangen van PVC, dit varieert van geen enkele vervanging tot rond 1 % van de totale lengte.

8.3 Cohortindeling

Een mogelijke cohortindeling voor PVC kan op de volgende basis gemaakt worden:

- Aanlegjaar op basis van de geïnventariseerde vervangingen (figuur 21 **Error! Reference source not found.**), aangelegd na 1980 wordt minder vervangen
 - 1966 - 1980
 - >= 1980
- Diameter, storingsfrequenties zijn (beperkt) diameterafhankelijk (Figuur 11)
 - <= 160 mm
 - > 160 mm
- Drukklassen, storingsfrequenties zijn wandspanning afhankelijk (Tabel 2)
 - 0,63 MPa
 - 0,75 MPa
 - 1,0 MPa

De periode voor 1965 wordt niet expliciet onderscheiden vanwege het diffuse beeld van de vervangingen van PVC uit deze periode, zie figuur 21. Omdat de drukklasse van de PVC leidingen niet altijd in de registratie is meegenomen is een onderscheid in drukklasse niet generiek te maken. Op basis van exitbeoordelingen van inbouwingen en eventuele inline wanddikte metingen is per leidingsegment een wanddikte vast te leggen.

8.4 Prioritering vervangingen, langetermijnplanning

Vervangingen worden vooral gestuurd door storingsfrequentie en ingrepen derden. Voor langetermijnplanning zijn dit moeilijk te plannen parameters. Als er geen storingsfrequentie is de storingsfrequentie niet vast te stellen. Ingrepen van derden zijn op de kortetermijn bekend maar op de langetermijn niet. Op basis van de cohortindeling is echter wel een prioritering voor langetermijnplanning op te stellen voor het bestand PVC leidingen. De hoogste prioriteit voor vervangen (zonder een levensduur hier aan toe te kennen) heeft het cohort (lage drukklasse, grote diameter, uit de periode voor 1980). Op deze wijze zijn 12 cohorten op te stellen (4 stuks per drukklasse) die arbitrair in te delen zijn. Volgens de huidige inzichten is de materiaalspanning onder belasting de parameter die de meest negatieve invloed heeft. Uit tabel 2 volgt dat onder normale belastingomstandigheden een drukklasse 0,63 te laag is voor een acceptabele spanning in het materiaal. De onderlinge prioritering tussen productiejaar, drukklasse en diameter is arbitrair maar kan voor het aanwezige PVC binnen het bedrijf opgesteld worden, in tabel 4 is dit voor de bekende cijfers uitgevoerd.

Tabel 4 Prioritering vervanging op basis van in LIS bekende gegevens op basis van de drukklasse 0,63

drukklassen	aanlegjaar	diameter	prioriteit	aanwezige % van PVC	opmerkingen
0,63	<1980	> 160	1	4,9	
0,63	<1980	<=160	2	35,4	
0,63	>=1980	> 160	3/4	59,6	geen onderscheid tussen diameters

Als er op basis van de storingsregistratie en exit onderzoek meer informatie ter beschikking komt van een bepaalde leiding zal deze informatie prevaleren boven de indeling op drukklasse, aanlegjaar en diameter.

9 Conclusies

Waterleidingen uitgevoerd in PVC worden gekenmerkt door een grote spreiding in materiaaleigenschappen. Op basis van uitgevoerd onderzoek aan uitgenomen buisdelen is een redelijk inzicht verkregen in de deze spreiding. Een en ander is vertaald in de kennisregels voor het beheer van het PVC leidingnet. Met deze kennisregels is een actief beheer van de PVC leidingen mogelijk.

De relevante eigenschappen van de PVC leidingen zijn op dit moment nog niet non-destructief te bepalen. De ontwikkeling van een techniek hiervoor is gestart in Wetsus verband met de Non Colinear Wave Mixing techniek. De eerste resultaten van deze techniek op een set proefstukken waarvan een aantal eigenschappen bekend zijn, heeft geen relatie opgeleverd waarmee deze eigenschappen gemeten kunnen worden.

De uitgevoerde inventarisatie voor de jaren 2014 – 2016 van de vervangingen en saneringen in het PVC-U leidingnet levert op dat er voor de periode 1965 – 1980 een licht verhoogde inspanning op dit gebied wordt gepleegd. De spreiding tussen de bedrijven is echter aanzienlijk.

De indeling in cohorten op basis van de uitgevoerde vervangingen door de bedrijven is niet goed mogelijk. Er zijn niet voldoende gegevens bekend van de vervangen leidingen. Een reactief beleid voor de vervanging van leidingen op basis van storingen en onderzoek of proactief op basis van onderzoek wordt aanbevolen.

10 Literatuur

- 1 Arsenio A.M. (2013). Lifetime prediction of PVC push-fit joints. Ph.d, TU Delft (Delft).
- 2 A. Boersma, J. Breen (2005) Long term performance prediction of existing PVC water distribution systems TNO I - IX
- 3 Breen, J. (2006). Levensduurverwachting van bestaande PVC leidingen, Management samenvatting MT-RAP-06-18659/mso
- 4 Breen J., Scholten F.J., 'De invloed van restspanningen op de weerstand van pvc-buizen tegen RCP', H2O-Online, 20 november 2013
http://www.vakbladh2o.nl/index.php?option=com_easyblog&view=entry&id=85&Itemid=171
- 5 Demcenko, A. Akkerman, R. Nagy, P.B. and Loendersloot, R. (2012) Non-collinear wave mixing for non-linear ultrasonic detection of physical ageing in PVC. NDT & E international, 49, 34 – 39. ISSN 0963-8695
- 6 Kiwa keuringseisen en beoordelingsrichtlijnen
K49 (1965) Keuringseisen Nr 49, Waterleidingbuizen van ongeplaciseerd polyvinylchloride. Gepubliceerd in "water", 12 augustus 1965
K49 (1972) Eerste herziening, 8 juni 1972
K49 (1977) Aanvulling per 1 januari 1977
BRL502/02 (1991) Waterleidingbuizen van PVC-U
BRL17301 (2007) Leidingssystemen van PVC voor het transport van drinkwater en ruwwater
- 7 Moerman, A., Beuken, R. (2015). USTORE, hét kennisinstrument voor het onderbouwen van vervangingsbeslissingen van (water)leidingen. H2O-Online, *in press*.
- 8 Scholten F.L., van der Stok E.J.W., 'Snelle scheurvoortplanting (RCP) in pvc-waterbuizen', H2O-Online, 2013
http://www.vakbladh2o.nl/index.php?option=com_easyblog&view=entry&id=86&Itemid=171
- 9 Struik L.C.A. (1977). Physical aging in amorphous polymers and other materials
- 10 Thacker George, 04 April, 2007
http://2beeps.chemicalblogs.com/79_pvc_tidbits/archive/153_pvc_101-a_primer_on_polyvinyl_chloride.html
- 11 Visser R. (2009) Residual Lifetime assessment of uPVC gas pipes. University of Twente, Enschede
- 12 Wols B.A., Moerman A., 'COMSIMA: model voor spanningen op ondergrondse leidingen', BTO2015.206 (S), mei 2015
- 13 Vewin drinkwaterstatistieken 1955 – 2013

- 14 WAVIN, persoonlijke mededelingen
- 15 Hernandez Delgadillo, H. (2017) persoonlijke communicatie, Wetsus, Leeuwarden

Bijlage I Overzicht eisen PVC

In dik gedrukt zijn de materiaaleisen die gevolgd zijn in de opeenvolgende eisen van PVC.

1965 K49

1. Uiterlijk
2. **Maten en maatafwijking, buitenmiddellijn, wanddikten**
3. **Weerstand tegen inwendige waterdruk bij 20 °C**
1 uur 420 kgf/cm² (42 MPa) bij 20°C
4. **Weerstand tegen inwendige waterdruk bij 60 °C**
1000 uur 100 kgf/cm² (10 MPa) bij 60 °C
5. **Weerstand tegen uitwendige slag of stoot bij 0 °C**
6. Invloed van verwarming
7. Invloed op het water
8. **Verwekingstemperatuur**
9. Lichtdoorlatendheid
10. Verbindingen
11. **Aan te brengen merken**
Nominale druk en fabriekskenmerk op beide buiseinden

In de toelichting van K49 wordt voor de bepaling van de noodzakelijke wanddikte de toelaatbare tangentiële wandspanning in het materiaal gesteld op 100 kgf/cm² (10 MPa).

1972 Eerste herziening

Eis nummer 3 en 4 zijn samengevoegd en uitgebreid met een 100 uur eis.

2. **Maten en maatafwijking, buitenmiddellijn, wanddikten**
3. **Weerstand tegen inwendige waterdruk bij 20 °C**
1 uur 42 MPa bij 20°C
100 uur 35 MPa bij 20°C
1000 uur 10 MPa bij 60 °C
10. **Aan te brengen merken**
Fabrieksnaam – KIWA – PVC – klasse – nominale middellijn in mm – nominale wanddikte in mm – productieperiode – extrudernummer. De beide laatste gegevens desgewenst in code

In de toelichting van K49 wordt voor de bepaling van de noodzakelijke wanddikte de toelaatbare tangentiële wandspanning in het materiaal gesteld op 125 kgf/cm² (12,5 MPa). Hiermee worden bij het handhaven van de wanddikten (zoals dit is gebeurd) de drukklassen van de buisdelen met 25% verhoogd.

1977 Aanvulling

Met het inzicht dat de geleergraad met dichloormethaan bepaald moet worden in plaats van aceton is K49 aangevuld met een eis voor weerstand tegen dichloormethaan.

11. Weerstand tegen dichloormethaan

De maximum gevonden aantasting moet minder bedragen dan de eis in code volgens NEN 7102 luidt: 4L; 4.2L; 4L

De betekenis van deze code is een toegestane lichte aantasting (L) op het volledige buitenoppervlak (4 kwarten); een toegestane lichte aantasting (L) over de volledige omtrek van de ring (4 kwarten) maar slechts over de helft van de wanddikte (2 kwarten); een toegestane lichte aantasting (L) op het binnenoppervlak (4 kwarten) van het buisdeel. Deze eis laat een lichte ondergelering van het materiaal toe.

In januari 1991 verschijnt BRL-K502/02 en hierin zijn de eisen opnieuw ingedeeld.

1. Materiaal
waaronder K-waarde (molecuulgewicht) $\geq 65,0$
2. Uiterlijk en kleur
Waaronder met het blote oog of onder een loep (max. vergroting 5 maal) zichtbare holten en verontreinigingen
3. Afmetingen en toelaatbare maatafwijkingen
Nominale en gemiddelde middellijn, onrondheid, wanddikten
4. Afschuining van de buiseinden
5. **Weerstand tegen inwendige waterdruk**
1000 uur bij 60 °C > 12,5 MPa (is verhoogd van 10 naar 12,5 MPa)
6. **Weerstand tegen slag of stoot**
Veranderingen in valhoogten en massa's per diameter, de impact is groter dan in K49
7. Invloed van verwarming
8. **Weerstand tegen dichloormethaan**
Geen aantasting, 0-0.0-0 bij 15 °C, NEN 7102 volgens vastgestelde afschuining
9. **Vicat-verwekingstemperatuur**
80 °C
10. Lichtdoorlatendheid
11. Afgifte van reuk, smaak en kleur
12. Afgifte van toxische stoffen
13. Aan-buis-gevormde cilindrische lijmmoffen
14. **Merken**
Fabrieksnaam of handelsmerk, PVC-U, nominale druk, nominale buitenmiddellijn en nominale wanddikte, productieperiode "jaar" en "week", extrudernummer
15. Kwaliteitscontrole

Met de verandering van de eis tegen aantasting door dichloormethaan is de kans op ondergelering niet meer aanwezig. Omdat de test echter geen onderscheidend vermogen heeft voor overgelering is de kans op overgelering aanwezig.

Met het verschijnen van BRL K17301, juli 2007 zijn de producteisen voor PVC buizen opnieuw ingedeeld

Producteisen voor PVC buizen

1. **Materiaal**
K-waarde $\geq 65,0$
2. **MRS waarde (Minimum Required Strength)**
25 MPa
3. Hergebruik van PVC-U materiaal
4. Uiterlijk
5. Kleur
6. Lichtdoorlatendheid
7. Afmetingen en toleranties
8. Afschuining buiseinden
9. Aan de buis gevormde cilindrische lijmmoffen
10. **Mechanische en fysische eigenschappen van de PVC-U buis**
Weerstand tegen inwendige waterdruk
Weerstand tegen slag of stoor
Weerstand tegen dichloormethaan NEN 580, 15 °C gedurende 30 minuten
Vicat verwekingstemperatuur
Invloed van verwarming
11. **Merken PVC-U drinkwaterbuizen**
Fabrieksnaam of handelsmerk, PVC-U, nominale druk, nominale buitenmiddellijn en nominale wanddikte, productieperiode "jaar" en "week", extrudernummer
De beide laatste gegevens desgewenst in code.