

BTO rapport

Een model voor scheurgroei in PVCU buizen, geïmplementeerd in Comsima



Bridging Science to Practice

BTO 2020.001 | Januari 2020

Een model voor scheurgroei in PVCU buizen, geïmplementeerd in Comsima

BTO 2020.001 | Januari 2020

Opdrachtnummer 402045-005

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

Opdrachtgever BTO - Thematisch onderzoek - Distributie

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

Kwaliteitsborger(s) dr. P. (Peter) van Thienen

Verzonden naar Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.

Een jaar na publicatie is het openbaar.

Keywords PVCU, degradatie, Comsima, scheurgroei

Jaar van publicatie 2020

Meer informatie

dr. ir. Karel van Laarhoven

⊤ +3130 6069697

E karel.van.laarhoven@kwrwater.nl

PO Box 1072 3430 BB Nieuwegein The Netherlands

⊤ +31 (0)30 60 69 511

F +31 (0)30 60 61 165

E info@kwrwater.nl

www.kwrwater.nl



Januari 2020 ©

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevens bestand, 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

Langzame scheurgroei en restspanning gemodelleerd in Comsima geven beter beeld van factoren die leidingfalen veroorzaken

Auteur(s): dr. ir. K.A. (Karel) van Laarhoven

Langzame scheurgroei en restspanning zijn twee belangrijke aspecten met invloed op het voortijdig falen van leidingen van PVCU, het meest toegepaste materiaal in het Nederlandse drinkwaterdistributienet. Door deze aspecten te modelleren in *Comsima*, een rekentool voor leidingconditie, kan deze tool een betere inschatting maken van de kans op het falen van een PVCU-leiding. Een gevoeligheidsanalyse van de op deze manier uitgebreide tool laat zien welke informatie cruciaal is voor een goede inschatting van de leidingconditie. De omvang van de imperfecties, de waterdruk, de restspanning hebben grote invloed op het voortijdig falen van PVCU-leidingen, net als combinaties van extreme waarden voor bijvoorbeeld wanddikte, druk, diepteligging en omvang van de imperfectie.



De gemodelleerde aspecten van leidingdegradatie. Links: breukvlak van een scheur die is ontstaan via langzame scheurgroei. Rechts: overlap in een doorgeknipte ring van een PVCU buis, veroorzaakt door restspanning.

Belang: falen en degradatie van PVCU begrijpen is cruciaal voor assetmanagement

PVCU (PVC zonder weekmakers, ook wel hard PVC) is het meest toegepaste leidingmateriaal in Nederland. Dit materiaal wordt sinds 1950 in het drinkwaterdistributienetwerk toegepast en inmiddels bestaat meer dan de helft van het net uit PVCUbuizen (meer dan 60.000 km). Het begrijpen van het faal- en degradatiegedrag van dit breed toegepaste leidingmateriaal is daarom belangrijk voor goed assetmanagement van het drinkwaterdistributienetwerk.

Aanpak:

Op basis van literatuurstudie zijn mathematischfysische modellen voor de belangrijkste opgesteld degradatiemechanismen van PVCU. Deze modellen zijn ingebed in *Comsima*, een rekentool voor leidingconditie. Via een gevoeligheidsanalyse met de uitgebreide tool *Comsima* is vervolgens onderzocht welke parameters de conditie en degradatie van PVCU-leidingen het meest beïnvloeden.

Resultaten: omvang imperfecties, waterdruk en restspanning beïnvloeden voortijdig falen

Een mathematisch-fysisch model voor langzame scheurgroei, inclusief de invloed die restspanning hierop heeft, kon worden geïntegreerd in *Comsima*. Uit literatuurstudie blijkt dat de invloed van fysische veroudering op langzame scheurgroei niet voldoende bevestigd en beschreven is om hiervoor een model op te stellen.

De voorspelling met *Comsima* op basis van het geïmplementeerde model blijkt primair zeer gevoelig te zijn voor de omvang van imperfecties in het materiaal en secundair voor de waterdruk en de restspanning in het materiaal. Ook blijkt dat er een samenspel van ongewoon hoge of lage waarden van verschillende parameters (bijvoorbeeld wanddikte, druk, diepteligging, omvang van de imperfectie) nodig is voor voortijdig falen.

Toepassing

De mathematisch-fysische modellen voor de belangrijkste degradatiemechanismen van PVCU kunnen worden gebruikt om het samenspel van modelparameters en de onzekerheden daarin te beoordelen op de totale kans dat de situatie van een leiding niet voldoet, bijvoorbeeld in de vorm van de kans dat de leiding vóór 100 jaar faalt. Succesvolle toepassing zal daarbij ook vooral afhangen van het verzamelen van de relevante invoerdata. Daarbij zal met name een onderbouwde inschatting van de materiaalparameters van oude buizen (zoals typische defectomvang, scheurgroeiparameters en restspanning) substantiële inspanningen vereisen.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in *Een model voor* scheurgroei in PVCU buizen, toegepast in Comsima (BTO 2020.001).

KWR PO Box 1072 3430 BB Nieuwegein The Netherlands



1

Inhoud

Inhoud2

1	Inleiding	3
1.1	Motivatie	3
1.2	Doel	4
1.3	Leeswijzer	4
2	Model	5
2.1	Uitgangspunt	5
2.2	Langzame scheurgroei	6
2.3	Restspanning	7
2.4	Fysische veroudering	10
2.5	Inbedding in Comsima	10
3	Gevoeligheidsanalyse	12
3.1	Inleiding	12
3.2	Aanpak	12
3.3	Invoerwaarden	12
3.3.1	Samenvatting	12
3.3.2	Wanddikte	13
3.3.3	Initiële defectgrootte	14
3.3.4	Materiaalparameters A en m	15
3.3.5	Waterdruk	15
3.3.6	Restspanning	16
3.3.7	Diepteligging	17
3.3.8	Bodemdichtheid	17
3.3.9	Young's modulus	17
3.4	Uitkomsten en discussie	17
4	Conclusies en aanbevelingen	22
4.1	Conclusies	22
4.2	Aanbevelingen	22
5	Referenties	25
I	Appendix	27
	Log of modifications to Comsima.	27

1 Inleiding

1.1 Motivatie

Het kunnen bepalen en voorspellen van de conditie van leidingsystemen is cruciaal voor goed assetmanagement van het drinkwaterdistributienetwerk. Het falen van onderdelen hangt af van een samenspel van uitwendige en inwendige belasting enerzijds en intrinsieke materiaaleigenschappen anderzijds: degradatie- en faalmechanismen zijn materiaalafhankelijk en worden sterk beïnvloed door de belasting. Een van de meest toegepaste leidingmaterialen is PVC (specifiek PVC zonder weekmakers: PVCU, *unplasticized PVC*). Dit materiaal wordt sinds 1950 in het drinkwaterdistributienetwerk toegepast en inmiddels bestaat meer dan de helft van het net uit PVCUbuizen (meer dan 60.000 km). Het begrijpen van het faal- en degradatiegedrag van dit breed toegepaste leidingmateriaal is daarom zeer belangrijk.

PVCU-buizen werden vroeger ontworpen met het oog op een levensduur van 50 jaar bij nominale belasting. Dit betekent dat de oudste buizen (ongeveer 10.000 km) al aan het eind van de ooit beoogde levensverwachting zijn. Eerder onderzoek [Boersma & Breen, 2005; Breen 2006] heeft echter uitgewezen dat een levensduur van 100 jaar mag worden verwacht voor PVCU-buizen van goede kwaliteit die niet boven de ontwerpdruk worden belast. Daarnaast zijn in dat onderzoek de optredende faal- en degradatiemechanismen benoemd en beschreven. Onderzoek naar de conditie van uitgenomen buisdelen tussen 2007 en 2017 [Mesman en van Laarhoven, 2018] heeft uitgewezen dat er in de praktijk grote variatie is in zowel de kwaliteit als de belasting van leidingen. Fundamenteel inzicht in het falen van PVC is dus van belang om te bepalen en verklaren welke leidingen 'voortijdig' falen, maar ook om een betere voorspelling van het aantal storingen van een verouderend PVCU-leidingnet te kunnen maken.

Door de wiskundige beschrijving van de verschillende faal-, degradatie- en belastingsmechanismen te combineren in één model, wordt meer inzicht verkregen in hun samenhang en de individuele bijdrage van elk aan het resulterende totale proces. De rekentool Comsima [Wols & Moerman, 2015] is met dat doel ontwikkeld. Comsima combineert fysische belastingmodellen met een geparametriseerde beschrijving van de leiding en omgeving om de leidingconditie numeriek te benaderen. Daarnaast is de tool uitgerust met de fenomenologische degradatiemodellen uit het Kennissysteem Levensduurbepaling [Beuken & Mesman, 2011], om op basis van beschikbare leidingdata een inschatting te maken van het moment waarop de leidingconditie niet meer zal voldoen. Op die manier kan de algemene kennis over degradatie worden toegepast op specifieke delen van het net, zodat meetgegevens en specificaties van het net kunnen worden vertaald naar informatie over de conditie.

Het doel van dit project is om Comsima uit te breiden met de actuele kennis van het materiaal PVCU. Voor dit materiaal zijn nog niet alle relevante processen in Comsima geïmplementeerd. Mechanische veroudering van het materiaal (scheurgroei), fysische veroudering van het materiaal en ingesloten ringspanningen ontbreken. Natuurkundige modellen zijn voor ieder van deze processen beschreven in de literatuur. In het project worden deze modellen in kaart gebracht, aangevuld of omgeschreven waar nodig en aan Comsima toegevoegd. Met het voltooide model zal vervolgens een gevoeligheidsanalyse worden uitgevoerd om te bepalen welke degradatiemechanismen dominant zijn en welke systeemparameters het belangrijkst zijn om te kennen. Op die manier wordt de actuele modelkennis van het falen van PVC als leidingmateriaal toegankelijk en inzichtelijk. De kennis wordt daarmee bruikbaar voor de ondersteuning en onderbouwing van saneringsbeslissingen, inspectieprogramma's, levensduurvoorspelling, exitbeoordelingen en de ontwikkeling van nieuwe technieken voor toestandsbepaling.

1.2 Doel

Het primaire doel van dit werk is een nieuwe implementatie van wiskundige modellen voor de belangrijkste degradatiemechanismen van PVC in een numeriek model binnen de rekentool Comsima. Op basis van analyse met het nieuwe model wordt vervolgens een uitspraak gedaan over welke parameters de conditie en degradatie van PVC leidingen het meest beïnvloeden.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden de modellen beschreven die op basis van literatuuronderzoek zijn geselecteerd voor implementatie in Comsima en wordt beschreven hoe deze implementatie is opgezet. Hoofdstuk 3 beschrijft de aanpak en uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse van het model. Hoofdstuk 4 geeft de conclusies en aanbevelingen die volgen uit dit onderzoek.

2 Model

2.1 Uitgangspunt

De versie van Comsima waar in dit project op is voortgebouwd is eerder beschreven door Wols en Moerman [2015, 2017]. Het degradatiemechanisme van PVCU dat in die versie is geïmplementeerd volgt het KSLB [Beuken en Mesman, 2011], in navolging van de aanbevelingen van TNO [Breen en Boersma, 2005]. Breen en Boersma stelden voor om de relatieve kwaliteit en restlevensduur van buizen te baseren op de geëxtrapoleerde relatie tussen belasting en falen volgens de normen voor weerstand tegen inwendige waterdruk [KIWA, 1972-2007; voor een historisch overzicht zie Mesman en van Laarhoven, 2018]. Hierin wordt gesteld dat een buis onder *iedere* constante belasting zal bezwijken, waarbij het precieze moment van falen, t_f (eenheid s), logaritmisch samenhangt met de in het buismateriaal heersende spanning waarbij in de toekomst falen zal optreden, de faalspanning σ_f (eenheid MPa):

$$\sigma_f = \sigma_v + C \cdot \log t_f$$

Daarbij is σ_y de bezwijkspanning (eenheid MPa), de spanning waarbij het materiaal onmiddellijk faalt. Verder is *C* hierbij een constante (eenheid MPa/log(s/s)) die de relatie tussen faalspanning en faalmoment beschrijft. De waarde van *C* is voor specifieke uitgenomen buizen in het verleden vastgesteld met driepuntsbuigproeven [Breen en Boersma, 2005; Mesman en van Laarhoven, 2018]. Comsima gaat hierbij uit van de hoogste optelsom van spanningen¹ die op enig punt in de buis optreedt.

Vergelijking 1 komt overeen met één van de typische faalmechanismen van PVCU: plastische vervorming onder constante belasting (type I in Figuur 1). Onder de belastingen die typisch van toepassing zijn in de drinkwatercontext is echter een ander mechanisme dominant: scheurgroei (type II in Figuur 1). Falen door degradatie van de PVCU-polymeren (type III in Figuur 1) is typisch niet relevant voor drinkwaterleidingen [Breen en Boersma, 2005; Visser 2009]. Zoals hierboven toegelicht is type I als in Comsima opgenomen. In dit hoofdstuk wordt uitgewerkt hoe type II, scheurgroei, op een goede manier kan worden ingebed in Comsima.



Figuur 1. De relatie tussen belasting en moment van falen voor PVCU buizen onder constante belasting kent typisch drie regimes. I: bij hoge spanningen gaat falen van de buis gepaard met aanzienlijke plastische vervorming (taaie breuk). II: bij lagere belastingen treedt 'quasi-bros' falen via de groei van een haarscheur (langzame scheurgroei). III: na verloop van tijd degraderen de polymeren in de buis en treedt falen door scheuren van de buis bijna onafhankelijk van de belasting op. Overgenomen van Visser (2009).

(1)

¹ Specifiek: spanningen door toedoen van waterdruk, verkeersbelasting, verticale bodembelasting en verschilzettingen worden opgeteld volgens het criterium van Von Mises.

2.2 Langzame scheurgroei

Langzame scheurgroei begint wanneer een trekspanning in het bulk materiaal zich concentreert rond een imperfectie (bijvoorbeeld ingesloten deeltje, een kras, of een holte). Door de spanningsconcentratie groeit rond deze imperfectie een scheur. Het is bekend dat het vormen van de scheur rond de imperfectie enige tijd kost, maar deze 'incubatietijd' wordt doorgaans niet meegenomen [Visser, 2009; Makris *et al.*, 2019] onder de aanname dat de incubatietijd verwaarloosbaar is ten opzichte van de verdere tijd die nodig is om de scheur uit te laten groeien tot een lek. Experimenteel werk van Davis en anderen [2001] en van Breen en Boersma [2005] heeft laten zien dat deze aanname terecht is. De verdere groei van de scheur vanaf incubatie wordt – onder andere in de context van een buiswand onder trekspanning – typisch beschreven met de Paris-Erdoganvergelijking:

$$\frac{da}{dt} = AK_I^m \tag{2}$$

Daarbij is *da/dt* (eenheid m/s) de snelheid waarmee de scheur groeit van moment tot moment. *K_l* (eenheid MPa·m^{0.5}) is de mate van spanningsconcentratie rond de scheur, de spanningsintensiteitsfactor (SIF). *A* en *m* materiaal zijn specifieke, eenheidsloze parameters die de weerstand tegen langzame scheurgroei van het materiaal vatten. Dit zijn fenomenologische parameters die de gecombineerde invloed beschrijven van materiaal (kwaliteits)aspecten zoals [Visser, 2009]:

- de chemische structuur van de polymeren;
- de gelering van het materiaal;
- de gebruikte toeslagstoffen;
- het productieproces (bijv. emulsie vs. suspensie).

A en *m* worden typisch empirisch vastgesteld voor specifieke materialen [Breen en Boersma, 2005, Burn et al., 2006].

Bij het vaststellen van de spanningsconcentratie kan de SIF worden uitgedrukt in de aparte bijdragen van de verschillende componenten van de spanning in het materiaal, zoals de spanningen vanwege waterdruk, bovenbelasting en restspanning (verder beschreven in paragraaf 2.3):

$$K_I = K_{I,waterdruk} + K_{I,bovenbelasting} + K_{I,restspanning}$$
⁽³⁾

De bijdrage van een specifieke component wordt berekend via:

$$K_{I,comp} = \sigma_{comp} \sqrt{\pi a} \cdot Y_{comp}(a/d) \tag{4}$$

waarbij σ_{comp} (eenheid MPa) de relevante component van de trekspanning rond de scheur is, *a* (eenheid m) de lengte van de scheur in de diepterichting van de buiswand en *d* (eenheid m) de wanddikte. Y_{comp} is een eenheidsloze geometrische factor die corrigeert voor veranderingen in de mate van spanningsconcentratie naarmate de scheur groeit. Veranderingen in het spanningsprofiel van σ_{comp} die relevant worden bij het groeien van de scheur zijn daarbij ook als een factor in Y_{comp} opgenomen. Er zijn uitgebreide naslagwerken met geometrische factoren voor veelvoorkomende belastingssituaties beschikbaar [bijv. Laham, 1998] en er zijn in de literatuur methoden beschreven om met eindige-elementenmethoden (FEM) geometrische factoren op te stellen voor specifieke gevallen [specifiek voor drukleidingen bijvoorbeeld: Lu et al, 2003; Burn et al., 2006; Hutar et al., 2011; Hutar et al., 2013].

Vergelijkingen (2) en (4) beschrijven samen een zichzelf versterkend proces waarin de SIF steeds hoger wordt en de scheur steeds sneller gaat groeien. Dit proces wordt langzame scheurgroei genoemd. Er komt een punt waarop de SIF zo hoog is dat de scheur nog sneller gaat groeien dan vergelijkingen (2) en (4) beschrijven. Dit wordt de kritische

stress intensiteit factor, *K_{IC}* genoemd. Het bereiken van *K_{IC}* gaat gepaard met het catastrofaal falen van het materiaal: de scheur breidt zich onmiddellijk uit tot de binnen en buitenwand van de buis zijn bereikt, waardoor een lek ontstaat. Vergelijkingen (2) tot en met (4) kunnen gebruikt worden om een gedetailleerd model van scheurgroei op te zetten als functie van belastingen en materiaalparameters.

Aan de Universiteit van Leoben [Balika en Lang, 2002; Pinter *et al.*, 2007] is een methode ontwikkeld om empirisch de relatie tussen belasting en het moment van falen volgens type II te bepalen (lijn II in Figuur 1). Toepassing van een dergelijke bepaling zou kunnen worden gebruikt om die relatie direct in Comsima te gebruiken, vergelijkbaar met de manier waarop vergelijking 1 de directe relatie tussen belasting en falen beschikbaar maakt in Comsima.

2.3 Restspanning

Tijdens het fabricageproces van PVCU buizen ontstaan tangentiële spanningen. Deze spanningen ontstaan doordat de buis van buitenaf wordt gekoeld: de buitenste lagen worden hard voordat de binnenste lagen helemaal zijn afgekoeld. De zachte binnenste lagen krimpen tijdens verdere afkoeling, maar deze krimp wordt tegengehouden doordat de zachte binnenste lagen wel versmolten zijn met de reeds harde buitenlaag. Het resultaat is een permanente verdeling van tangentiële spanningen in het materiaal: trekspanningen in de binnenste lagen en compressiespanningen in de buitenste lagen. Deze spanningen blijven permanent aanwezig in de buis, hoewel visco-elastische relaxatie² van het PVC na verloop van tijd leidt tot een afname in spanningen tot ongeveer 40% van de originele waarden [Janson, 1995]. De restspanningen hebben geen effect op falen van type I, maar hebben wel veel invloed op het initiëren en groeien van scheuren bij falen via type II [Whiters, 2007; Coules et al., 2018]. Bij het inbouwen van een model voor langzame scheurgroei is het daarom ook van belang om restspanningen mee te nemen in Comsima.

Zhang *et al.* (2002) beschrijven een model voor het restspanningsprofiel dat optreedt bij het koelen van thermoplasten op basis van productieparameters:

$$\sigma_{res}(z) = \frac{E}{2(1-\nu)} \cdot \beta \left(T_f - T_g \right) \cdot \left(ln \left[\frac{d+\Delta}{z+\Delta} \right] - \frac{z}{z+\Delta} \right)$$
(5)

Daarin is *E* de Young's modulus (eenheid GPa), ν de Poisson's ratio (eenheid -), β (eenheid K⁻¹) de coëfficiënt voor lineaire thermische uitzetting van het materiaal in vaste toestand, T_g (eenheid K) de glastemperatuur van het materiaal, T_f (eenheid K) de temperatuur waarnaar het materiaal gekoeld wordt, *d* de buiswanddikte, *z* de positie in de buiswand (0 = buitenwand, d = binnenwand), en Δ (eenheid m) de dikte van een virtuele laag PVC rond de buitenwand met temperatuur T_f , die wordt toegevoegd om de capaciteit voor koeling van de daadwerkelijke buitenwand te modeleren. De dikte van de virtuele laag Δ wordt daarbij berekend via:

$$\Delta = d \cdot \left(0.04 + \frac{1.37}{Bi}\right) \tag{6}$$

met daarin Bi het getal van Biot, de verhouding tussen koelcapaciteit en warmtegeleiding van het materiaal:

$$Bi = \frac{L_c h}{k} \tag{7}$$

met *h* (eenheid W/m²/K) de warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie, *k* (eenheid W/m/K) de warmtegeleidingscoëfficiënt en L_c (eenheid m) een karakteristieke lengteschaal, gelijk aan *d* in dit geval. De warmteoverdrachtscoëfficiënt *h* representeert daarbij de geleiding van warmte vanuit het PVCU naar het koelwater, zodat T_f , en *h* de restspanning relateren aan productieomstandigheden, terwijl de overige parameters materiaaleigenschappen (*k*, T_g , β , *E* en *v*) of geometrische buiseigenschappen (*d* en L_c) zijn.

² Tijdsafhankelijke vervormingsgedrag bij belasting dat typerend is voor onder andere thermoplasten zoals PVCU.

Omdat de productieomstandigheden van bestaande buizen moeilijk terug te vinden zijn, stelden Breen en Boersma [2005] een methode voor om het spanningsprofiel te herleiden uit een eenvoudige meting. Wanneer een ring van de buis wordt afgezaagd, en deze ring vervolgens wordt doorgeknipt, dan zorgt het restspanningsprofiel ervoor dat de ring naar binnen buigt (Figuur 2). Breen en Boersma nemen vervolgens een lineair spanningsprofiel aan tussen een compressiespanning op de buitenwand en een trekspanning op de binnenwand van gelijke sterkte. De extreme waarden van trekspanning en compressiespanning kunnen dan als volgt worden berekend:

$$\sigma_{res,max} = \frac{l_0 \cdot d}{4\pi \cdot R^2} \cdot E \tag{8}$$

Met daarin *l*₀ de lengte van de overlap en *R* de gemiddelde straal van de buis. De bovengenoemde aanname van een lineair profiel is een vereenvoudiging; in werkelijkheid is de vorm asymmetrisch gebogen. Poduska et al. [2014, 2016] stelden experimenteel een karakteristieke vorm van het spanningsprofiel vast die bleek te gelden voor verschillende typen plastic buizen (polyethyleen, polypropyleen). Vervolgens ontwikkelden zij een empirische formule om dit profiel op een vergelijkbare manier te koppelen aan de overlap die gemeten kan worden in een doorgeknipte ring, als verfijning op het model van Breen en Boersma:

$$\sigma_{res}(z) = c \cdot \left(e^{3,2\frac{z}{d}} - 7.35 \right)$$
(9)

waarbij de term met de exponent overeenkomt met de karakteristieke vorm van het spanningsprofiel en de constant *c* wordt berekend via:

$$c = \frac{\frac{l_0}{2\pi} E \cdot (R - R_{neutral})}{\left(R_{neutral} - \frac{l_0}{2\pi}\right) \left(-0.004R_{neutral} + 0.004\left[R - \frac{d}{2}\right] - 1.68d\right)}$$
(10)

met R_{neutral} de radius waarop de restspanning in de buis precies 0 is, berekend als:

$$R_{neutral} = \frac{d}{2 \cdot ln \left(\frac{R + \frac{d}{2}}{R - \frac{d}{2}}\right)} \tag{11}$$

Ter illustratie zijn de drie modellen in Figuur 3 toegepast op de situatie die hoort bij de buis die is gefotografeerd in Figuur 2. De rode band komt overeen met de spanningsverdelingen die volgen uit het fysische model van Zhang en anderen, wanneer rekening gehouden wordt met een onzekere koeltemperatuur (tussen de 5 en 25 °C) en een onzekere warmteoverdrachtscoëfficiënt (tussen de 0,5 en de 50.000 W/m²K, gekozen om ruim rekening te houden met variaties op de typische waarden bij opgelegde convectie door water van 50-10.000 W/m²K). Zowel het eenvoudige analytische model van Breen en Boersma als het verfijnde empirische model van Poduska et al. komt qua orde van grootte goed overeen met het fysische model. Wat betreft de inschatting van de maximale resttrekspanning op de buitenzijde van de buis maken deze modellen respectievelijk een pessimistische en een optimistische schatting van de spanning binnen de onzekerheid van het fysische model.



Figuur 2. Doorgeknipte ring van een 400 mm PVCU buis. Door de restspanning aanwezig in het materiaal trok de buis na het doorknippen naar binnen en ontstond een 52 mm overlap.



Figuur 3. Vergelijking van verschillende modellen voor het restspanningsprofiel in buizen. De modellen zijn toegepast op een buis die voor schadeonderzoek is uitgenomen (het betreft een buis met een diameter van 400 mm, een wanddikte van 12.5 mm en een leeftijd van 43 jaar bij uitname, (figuur 2) en getest op restspanning (een gemeten overlap van 52 mm na het doorknippen van een ring). Het model van Breen en Boersma (groen) neemt een lineair spanningsprofiel aan tussen een compressiespanning op de buitenwand en een trekspanning op de binnenwand van gelijke sterkte. Het model van Poduska en anderen (blauw) neemt een spanningsprofiel met een experimenteel vastgestelde, karakteristieke vorm (vergelijking (9)) aan waarbij geldt dat de trekspanningen en compressiespanningen elkaar gesommeerd over de buiswand opheffen. Het fysische model van Zhang en anderen (rood) volgt vergelijking (5), met de typische materiaaleigenschappen van PVC daarin ingevuld (waarbij, gezien de leeftijd van de buis, wordt aangenomen dat de waarde van de elasticiteitsmodulus is gerelaxeerd naar 40% van de originele, zoals vastgesteld door Janson [1995]). De rode band geeft de variatie van het model van Zhang voor koelwatertemperaturen tussen de 5 en 25 °C en voor warmteoverdrachtscoëfficiënten tussen de 0,5 en 50.000 W/m²K (ruim rond de typische waarde van 50-10.000 W/m²K).

2.4 Fysische veroudering

Fysische veroudering is een algemeen proces dat optreed in polymeren in de glastoestand (zoals PVCU), zoals grondig beschreven door Struik [1977]. Tijdens dit proces bewegen polymeerketens steeds langzamer, steeds verder naar elkaar toe, met onder andere een kleine toename in bezwijkspanning als gevolg (σ_y in vergelijking (1)). Ook leidt dit proces tot een verlaging van de slagbestendigheid [Breen en Boersma, 2005].

Door de toename in bezwijkspanning stijgt de bezwijkspanning en falen van type I wordt daardoor in principe vertraagd. Daarnaast kan de verhoging van de bezwijkspanning ervoor zorgen dat de plastische deformatie bij falen van type I ontaard in een plotselinge scheur in plaats van taaie rek (niet te verwarren met de langzaam groeiende scheur die zich ontwikkeld tijdens falen van type II). Beide effecten zijn door Visser [2009] in kaart gebracht en modelmatig uitgewerkt voor de context van PVCU gasbuizen. Drenth [2015] liet zien dat de snelheid van verandering van de bezwijkspanning via dit proces sterk verschilt tussen buizen onderling en liet zien dat deze spreiding tot op heden niet kan worden verklaard vanuit een breed scala van buiseigenschappen en productieparameters.

Bij tragescheurgroeiexperimenten uitgevoerd door TNO [Breen en Boersma, 2005] leek artificieel versnelde fysische veroudering in een aantal gevallen wel en in een aantal gevallen geen effect te hebben op het falen volgens type II, langzame scheurgroei bij relatief hoge belastingen. De reden hiervoor werd niet gevonden. Resultaten van Visser [2009] tonen dat fysische veroudering geen effect heeft op de relatie tussen spanning en faalmoment tijdens falen volgens type II bij lagere belastingen, wanneer dit wordt opgewekt via cyclische belasting. Eerdere experimenten van Mandel [1982] suggereren dat fysische veroudering ook geen effect heeft op het faalcriterium voor scheurgroei (de fracture toughness, *K_{IC}*, zie ook paragraaf 2.2). Kiwa (2018) geeft aan tot op heden geen effecten van fysische veroudering te hebben gevonden met betrekking tot de achteruitgang van mechanische eigenschappen van buizen uit het veld die onder natuurlijke omstandigheden zijn verouderd.

2.5 Inbedding in Comsima

Op basis van de ervaringen van Burn en anderen [Lu et al., 2003, Burn et al., 2006] is gekozen om het scheurgroeimodel dat wordt gegeven door vergelijkingen (2) tot en met (4) in Comsima in te bouwen als een *time marching loop*. Dit wil zeggen dat de ontwikkeling van de scheur (met beginlengte a₀, de omvang van de initiële imperfectie) met de tijd stapsgewijs wordt berekend door steeds:

- de SIF te bepalen (vergelijkingen 3 en 4);
- de SIF te vergelijken met de kritische SIF;
- de scheursnelheid uit te rekenen (vergelijking 2);
- de scheurlengte aan te passen.

Deze stappen worden herhaald tot de kritische SIF bereikt is en de scheur leidt tot falen. Deze aanpak is qua rekentijd intensiever dan een analytische methode die werd voorgesteld door TNO [Breen en Boersma, 2005], maar heeft een paar belangrijke voordelen: deze aanpakt voorkomt de noodzaak voor een paar zeer ingrijpende vereenvoudigingen die de nauwkeurigheid van de resultaten aantasten en deze aanpak maakt het mogelijk om het model modulair op te zetten met betrekking tot de bijdrage van verschillende belastingscomponenten, zodat eventuele toekomstige uitbreidingen van Comsima in principe goed met dit model zullen kunnen samenwerken. Op dit moment is het scheurgroeimodel aangesloten op de tangentiële spanningscomponenten die een rol spelen in Comsima (bovenbelasting en waterdruk) en de nieuwe tangentiële spanningscomponent restspanning (zie ook hieronder). Een model voor de mogelijke invloed van axiale buigspanningen (verkeersbelasting, verschilzetting) is in de literatuur niet gevonden en is op dit moment niet meegenomen. Bovenstaande aanpak leidt tot een aantal nieuwe invoerparameters die aan Comsima meegegeven moeten worden:

- De omvang van de imperfectie, a₀, die dienst doet als de lengte van de scheur bij aanvang van het proces. De verdeling van grootten van imperfecties in de polymeermatrix is niet zomaar te meten. Bij exitbeoordelingen kan wel de omvang van de imperfectie die tot scheurgroei leidde bepaald worden door middel van breukvlakinspectie.
- De materiaalparameters *A* en *m* die de snelheid van langzame scheurgroei onder belasting bepalen; Deze parameters kunnen in het lab bepaald worden voor specifieke buizen/buistypen (bijvoorbeeld beschreven door Davis en anderen [2001] en Burn en anderen [2006]).
- De materiaalparameter K_{IC} die het faalcriterium voor de scheur bepaalt. Deze parameter kan in het lab bepaald worden voor specifieke buizen/buistypen (bijvoorbeeld beschreven door Breen en Boersma [2005] en Burn en anderen [2006]).

Omdat restspanning specifiek relevant is voor falen van type II, scheurgroei, en niet voor falen van type I, is de restspanning in Comsima direct gemodelleerd als een spanningsbijdrage binnen het bovengenoemde scheurgroeimodel. Daarbij is gebruik gemaakt van een geometrische factor *Y* (zie ook vergelijking 4) die gepast is voor een restspanningsprofiel zoals met FEM bepaald door Lu en anderen (2003). Dit levert één extra invoerparameter voor Comsima op: de resttrekspanning aan de binnenkant van de buiswand. Deze kan ingeschat worden op basis van literatuurwaarden, of de specifieke waarde kan worden bepaald op basis van een meting. Bij exitbeoordelingen is een relatief eenvoudige, destructieve meting door middel van het doorknippen van een buisring beschikbaar (en die meting kan vervolgens verwerkt worden met behulp van het model van vergelijking 8).

De eventuele invloed van fysische veroudering op falen van type II is onduidelijk en nog niet uitvoerig bevestigd in de literatuur en er is dus ook nog geen rekenmodel voor beschikbaar. De invloed van fysische veroudering op het falen van type I is wel beschreven en het model van de Technische Universiteit van Eindhoven (Visser, 2009; Kanters, 2015) hiervoor zou kunnen worden gebruik als een 2^e orde correctie op de implementatie van vergelijking 1. Aangezien falen van type I echter typisch niet relevant is voor de context van drinkwaterleidingen, is deze correctie vooralsnog niet doorgevoerd. Een dergelijke correctie is aan te bevelen wanneer blijkt dat Comsima de levensduur van buizen bij hoge druk onderschat.

In bijlage I wordt een kort overzicht gegeven van de verschillende aanpassingen die in de code van Comsima zijn gemaakt om deze modellen in te bedden.

3 Gevoeligheidsanalyse

3.1 Inleiding

Het model dat in het vorige hoofdstuk is beschreven introduceert enkele invoerparameters in Comsima. Bovendien is het model gekoppeld aan het originele spanningsmodel en is het dus ook afhankelijk van de originele invoerparameters. In dit hoofdstuk wordt de gevoeligheid van het model voor de verschillende invoerparameters van Comsima in kaart gebracht. Op die manier wordt meer inzicht verkregen in de bruikbaarheid van het model onder beperkte beschikbaarheid van data en wordt meer inzicht verkregen in het relatieve belang van verschillende parameters als het gaat om het verzamelen van data.

3.2 Aanpak

De gevoeligheidsanalyse gaat uit van een basisscenario waarin een specifieke waarde gedefinieerd is voor iedere invoerparameter. Het moment van falen dat in dit scenario wordt berekend door Comsima dient als referentie voor de verdere analyse. Vervolgens wordt voor één parameter de waarde over een bepaald bereikgevarieerd en wordt de invloed hiervan op het berekende moment van falen bijgehouden. De waarde wordt hierbij over twee verschillende bereiken gevarieerd. Ten eerste worden waarden gekozen die 0,5%, 2,5% of 5% boven of onder de initiële waarde liggen. Op die manier wordt een indruk verkregen van de invloed van een 1%, 5% of 10% onzekerheid in de parameterwaarde, bijvoorbeeld vanwege een meetonzekerheid. Ten tweede wordt de waarde gevarieerd over het bereik van waarden dat de parameter in de praktijk kan hebben (zie ook paragraaf 3.3). Op die manier wordt inzicht verkregen in het praktische belang van de parameter binnen het totale proces van belasting, scheurgroei en falen. Tenslotte worden deze stappen herhaald voor iedere invoerparameter.

Voor een paar parameters, de materiaaleigenschappen *A* en *m*, die de snelheid van scheurgroei bepalen in vergelijking 2, is geen zinnig bereik te definiëren. Deze parameters worden typisch in combinatie experimenteel vastgesteld. Bovenstaande analyse wordt daarom herhaald voor een paar combinaties van *A* en *m* die in de literatuur beschreven zijn (zie ook paragraaf 3.3.4).

Bovenstaande analyse wordt herhaald voor drie basisscenario's, omdat de gevoeligheid voor de ene parameter kan afhangen van de specifieke waarden van de andere parameters. De eerste twee scenario's zijn gebaseerd op exitbeoordelingen van twee gestoorde buizen die drinkwaterbedrijven in het verleden hebben laten analyseren [Mesman en van Laarhoven, 2018]. Deze scenario's representeren realistische combinaties van parameterwaarden die tot voortijdig falen leiden. Een derde scenario wordt geconstrueerd door voor iedere parameter de mediaan van het bereik van waarden in de praktijk te nemen. Hoewel dit scenario synthetisch is, kan het worden opgevat als een realistische combinatie van parameterwaarden die niet op voorhand al dicht bij falen zit.

3.3 Invoerwaarden

3.3.1 Samenvatting

Het bereik van waarden dat de verschillende invoerparameters in de praktijk hebben is bepaald op basis van verschillende bronnen die in de opvolgende paragraven per parameter nader zijn besproken. De verschillende bereiken van parameterwaarden en de specifieke invoerwaarden die bij de verschillende scenario's horen zijn samengevat in Tabel 1.

Parameter			bereik		scenariowaarden		
Naam	symbool	eenheid	min	max	1	2	3
diameter	D	mm	-	-	400	500	400
wanddikte	d	mm	11,8 (400 mm)	13,6 (400 mm)	12,8	12,4	12,6
			12,1 (500 mm)	17,2 (500 mm)			
waterdruk	р	kPa	200	600	400	200	330
initiële defectomvang	a _o	mm	0,012	1,48	1,2	1,1	0,33
Young's modulus	E	GPa	2,75	3,25	3	3	3
restspanning	$\sigma_{residual}$	MPa	1.8	5.5	3.8	4.0	3.6
droge bodemdichtheid	ρ_{dry}	kg/m ³	1200	2000	1900	1900	1900
diepteligging	Н	mm	500	2000	800	1900	2000

Tabel 1. Scenariowaarden en het bereik in de praktijk van de verschillende invoerparameters voor Comsima. Het bereik van wanddikten hangt af van de diameter van de buis in het scenario.

3.3.2 Wanddikte

De minimum wanddikte van PVCU buizen wordt aan de diameter gerelateerd via de drukklasse. In de praktijk bestaat er echter een (kleine) variatie in de wanddikte van buizen, zowel binnen de buis als tussen 'identieke' buizen. Omdat scheurgroei een lokaal verschijnsel is, kan het belangrijk zijn om de werkelijke wanddikte op locatie van de scheur te kennen. Figuur 4 geeft een indicatie van de verdeling die optreedt in de werkelijke wanddikten van buizen, op basis van 381 wanddiktemetingen die zijn verricht tijdens 21 exitbeoordelingen. In deze basale analyse is een relatieve verdeling van waarden rond de gemiddelde buiswaarden opgesteld. De ingetekende waarden van scenario's 1 en 2 geven aan hoe de wanddikten die zijn gebruikt voor analyse van de schade zich verhouden tot de gemiddelde wanddikte van de buis in kwestie. De ingetekende waarde van scenario 3 komt overeen met de mediaan van de data.

Bij een gedetailleerdere analyse zou het interessant zijn om de verdeling van waarden relatief aan de minimum waarden die worden voorgeschreven door de drukklasses op te stellen. Daarmee zouden cataloguswaarden kunnen worden vertaald naar de bijbehorende verdeling van mogelijke wanddikten en dit zou een waardevolle stap zijn om algemene cataloguswaarden bruikbaar te maken voor Monte-Carlo-analyse met Comsima [Als één waarde gekozen moet worden, is de catalogus waarde een logische keuze die 'aan de veilige kant zit. Zie van Laarhoven *et al.*, 2019 voor een bredere discussie van de rol van dit soort kansdichtheidsverdelingen van parameterwaarden in conditiemodellen].



Figuur 4. De verdeling van de wanddikte (t) in buizen ten opzichte van het buisgemiddelde ($t_{\mu,buis}$), voor 400 mm (oranje) en 500 mm (blauw) buizen.

3.3.3 Initiële defectgrootte

Vanuit de theorie is bekend dat het verloop van scheurgroei erg gevoelig is voor de initiële omvang van de imperfectie die fungeert als spanningsconcentrator. De typische concentratie en omvang van dergelijke defecten is echter moeilijk vast te stellen en er zijn maar weinig metingen gerapporteerd in de literatuur. De meest recente beschouwing van het onderwerp noemt een waardebereik van 100-400 µm [Makris et al., 2019]. Davis en anderen [2007] hebben empirisch een bredere verdeling van karakteristieke defectgrootten vastgesteld in een uitgebreid programma van exitbeoordelingen (voor Australische buizen). De verdeling is weergegeven in Figuur 5. Het gaat hier om de verdeling van de omvang van het grootste deeltje dat in een buis zal worden aangetroffen (niet noodzakelijk identiek aan de verdeling van deeltjesgrootten in de buis). Bij het gebruik van deze verdeling hoort dus de aanname dat de buis faalt door een scheur die rond het grootste deeltje in de buis groeit. De minimum en maximum waarde die in de gevoeligheidsanalyse worden aangehouden komen overeen met de 1 en 99 percentielwaarden van deze verdeling (ook gemarkeerd in de figuur).



Figuur 5. De verdeling van maximale deeltjesgrootte die in een buis voorkomt volgens Davis en anderen (2007).

3.3.4 Materiaalparameters A en m

In Tabel 2 worden twee verschillende combinaties van *A* en *m* die in de analyse zijn gebruikt weergegeven. Deze parameters worden typisch in combinatie bepaald voor een specifieke buis of type buizen. Hier wordt gebruik gemaakt van meetwaarden die voor specifieke, buitenlandse typen PVCU buizen zijn gerapporteerd in een AWWAonderzoek [Burn et al., 2006]. In Nederland zijn typisch buizen van een ander type toegepast (gestabiliseerd met loodzout [Breen en Boersma , 2005]) waarvoor andere waarden verwacht mogen worden. Deze parameters zouden beter op de praktijk van Nederlandse drinkwaterbedrijven kunnen worden afgestemd met data van buizenproducenten, indien beschikbaar, of met de methoden die zijn gerapporteerd door Burn.

Type buis	A	m
PVCU, stabilisator Ca/Zn, uit Australië	7,24e-13	17,80
PVCU, stabilisator Sn, uit Amerika	1,37e-15	20,83

Tabel 2. Specifieke waarden voor scheurgroeiparameters A en m, gemeten voor specifieke typen buizen.

3.3.5 Waterdruk

Ruwweg komen er waterdrukken tussen de 200 en de 600 kPa voor in het Nederlandse distributienet. Figuur 6 illustreert de verdeling van drukken in een gebied van PWN dat geanalyseerd werd door Wols en Moerman (2018). De waarde voor het synthetische scenario 3 is gekozen op basis van de mediaan van dezelfde data.



Figuur 6. Variatie in waterdruk binnen het pilotgebied van PWN dat werd geanalyseerd door Wols en Moerman (2018). De waterdruk die gold voor de exitbeoordeling die model stond voor scenario 2 (200 kPa) valt buiten het bereik dat hoort bij dit gebied.

3.3.6 Restspanning

In de literatuur worden typische waarden van 1,5 tot 4,8 MPa gerapporteerd voor de resttrekspanning in buizen van verschillende diameters [Makris et al., 2019]. Figuur 7 geeft een histogram van de restspanningen die gemeten zijn tijdens 21 exitbeoordelingen van de drinkwaterbedrijven. De waarden voor scenario's 1 en 2 zijn ingetekend in de figuur. De mediaan waarde voor scenario 3 is bepaald uit de data in het histogram.

8





Figuur 7. Verdeling van restspanningen die gemeten zijn bij exitbeoordelingen van PVCU buizen.

3.3.7 Diepteligging

Er is geen uitgebreide data over de diepteligging van PVCU buizen in Nederland gevonden. Het uitgangspunt van de waterbedrijven is een diepteligging van 1 m, maar in de verschillende exitbeoordelingen die zijn gerapporteerd zijn waarden tussen de 0.7 en 1.9 m aangetroffen. Op basis daarvan wordt voor de gevoeligheidsanalyse een bereik van 0.5-2 m gekozen. Voor het synthetische scenario 3 wordt het uitgangspunt van 1 m aangehouden.

3.3.8 Bodemdichtheid

NEN 3650 geeft waarden die aangehouden kunnen worden voor de bodemdichtheid voor verschillende bodemtypen en verschillende kwaliteit van inklinking [NEN 3650-1:2012, Tabel B.1]. Er is geen uitgebreidere data over de verdeling van waarden voor bodemdichtheid rond deze algemene waarden gevonden. Voor het bereik van de gevoeligheidsanalyse wordt uitgegaan van 1200 kg/m³ (veen) – 2000 kg/m³ (vast zand).

3.3.9 Young's modulus

Er is geen uitgebreide verdeling van waarden van de Young's modulus van PVCU buizen gevonden in de literatuur. Breen en Boersma [2005] rapporteren waarden tussen de 3,01 en 3,19 GPa met een onzekerheid van maximaal 0.25 GPa voor enkele Nederlandse buizen. Op basis van die data is een bereik van 2,75-3,25 GPa gekozen voor de gevoeligheidsanalyse. Voor alle drie de scenario's wordt de normwaarde van 3 GPa aangehouden [NEN 3650-1:2012].

3.4 Uitkomsten en discussie

In Figuur 8 zijn de uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse samengevat wanneer uit wordt gegaan van PVCU met Ca/Zn als vulstof. Per scenario wordt het bereik aan faalmomenten weergegeven dat mogelijk wordt wanneer één

parameter varieert. Het gekleurde bereik komt daarmee overeen met de 1%, 5% en 10% onzekerheid in de parameter waarde. Het zwarte bereik komt overeen met de variatie in waarden die in de praktijk is geobserveerd. Om de bereiken uit de praktijk beter te kunnen duiden, geven de P_{xx} de percentielen in de parameter waarden. P_{99} op het bereik van a_0 markeert bijvoorbeeld de scheidslijn tussen de faalmomenten die horen bij de 99% kleinste deeltjes en de 1% grootste deeltjes. De bereiken zijn afgekapt bij 200 jaar omdat het weinig zin heeft om te proberen voorbij dat soort tijdschalen te voorspellen. De volgende zaken vallen op:

- Voor zowel scenario 1 als scenario 2 geldt dat het model het werkelijke moment van falen met 5 tot 10 jaar overschat. In beide gevallen valt deze overschatting binnen de spreiding die ontstaat bij 5% tot 10% onzekerheid in één van de meer gevoelige parameters. Een overschatting van de praktijk is te verwachten, omdat het aannemelijk is dat een buis die over enkele jaren spontaan zal falen via scheurgroei vóór die tijd gemakkelijk tot falen gebracht kan worden door een externe prikkel.
- In scenario 3 (alleen mediaanwaarden) kan alleen een uitzonderlijk grote imperfectie (ongeveer de grootste 2%) leiden tot voortijdig falen.
- Op de tijdschaal die relevant is voor de drinkwatercontext (~100 jaar) is het model erg gevoelig voor variaties in parameterwaarden in scenario 1 en 2. Een paar procent onzekerheid in één van verschillende parameters leidt tot een onzekerheid in faalmoment van decennia. Het is daarmee onwaarschijnlijk dat dit model effectief kan worden gebruikt voor een correcte voorspelling van een faalmoment op basis van meetdata.
- In zowel scenario 1 als 2 was er sprake van een zeer grote imperfectie als oorsprong van falen (deeltjes die volgens de verdeling bij respectievelijk de 3% en 4% grootste deeltjes hoorden). Toch zou ook in deze scenario's het faalmoment voorbij de 100 jaar kunnen komen te liggen wanneer één parameter over het realistische bereik verandert:
 - Wanneer de restspanning in scenario 1 bijvoorbeeld bij de 15% laagste restspanningen zou horen in plaats van de ~15% hoogste, zou de buis niet gefaald zijn.
 - Wanneer de buis uit scenario 2 tussen de 1,2 en 0,8 m diep in de grond had gelegen in plaats van op 1,9 m diepte, zou het faalmoment ver voorbij de 200 jaar hebben gelegen.

De buis in scenario 2 zou nog veel eerder gefaald hebben als de waterdruk niet zo uitzonderlijk laag was.
 Dit onderstreept dat, hoewel het proces zeer gevoelig is voor de verschillende parameters, het nog steeds een samenspel van uitzonderlijk hoge waarden in verschillende parameters is, dat tot falen leidt. Het model kan nuttig zijn om deze optelsom van omstandigheden te beoordelen.

• De gevoeligheid voor variatie in parameters is anders in scenario 2 dan in scenario 1. Dit onderstreept opnieuw dat het niet één parameter is die tot falen leidt, maar dat de parameters elkaars belang beïnvloeden.

Aangezien tussen opvolgende percentielen van de omvang van imperfectie een verschil in faalmoment van decennia bestaat, mag gesteld worden dat de omvang van de initiële imperfectie de meest invloedrijke parameter is. Dit is in lijn met de bevindingen van eerdere auteurs [Bren en Boersma, 2005; Burn *et al.*, 2006]. Om het belang van de overige parameters verder te onderzoeken, zijn de scenario's in Figuur 9 opnieuw doorgerekend, maar dan met de omvang van de imperfectie aangepast naar 0.85 mm, wat overeenkomt met het 90^{ste} percentiel van deeltjesgroottes in de verdeling uit Figuur 5. In die situatie blijkt dat alleen een hoge waterdruk en in mindere mate een hoge restspanning kunnen leiden tot falen vóór 100 jaar en dus secundaire invloedrijke parameters zijn.

In figuur 10 zijn de uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse samengevat wanneer uit wordt gegaan van PVCU met Sn als vulstof. Dit materiaal blijkt echter zo goed bestand tegen scheurgroei dat praktisch alle faalmomenten voorbij de 200 jaar vallen. Hieraan kunnen verder weinig conclusies verbonden worden, anders dan dat het onderstreept dat het van belang is om de juiste waarden voor de scheurgroeiparameters *A* en *m* te kennen. BTO 2020.001 | Januari 2020



Figuur 8. Samenvatting van de gevoeligheidsanalyse voor de materiaalparameters voor PVCU met Ca/Zn als vulstof uit Tabel 2. Per scenario wordt per parameter aangegeven wat het bereik in faalmomenten is dat mogelijk wordt wanneer één parameter wordt gevarieerd. Het gekleurde bereik representeert daarbij een variatie van 0.5%, 2.5% of 5% rond de originele waarde. Het zwarte bereik representeert de variatie over alle waarden die in de praktijk zijn geobserveerd. De verticale lijnen zijn het werkelijke moment van falen voor de scenario's gebaseerd op schadegevallen.



Figuur 9. Samenvatting van de gevoeligheidsanalyse voor de materiaalparameters voor PVCU met Ca/Zn als vulstof uit Tabel 2.De figuur is op dezelfde manier gegenereerd als figuur 8, met als verschil dat de grootte van de imperfectie in de scenario's is aangepast naar 0,85 mm (90 percentiel van deeltjesgrootten in de verdeling uit figuur 5).

BTO 2020.001 | Januari 2020



Figuur 10. Samenvatting van de gevoeligheidsanalyse voor de materiaalparameters voor PVCU met Sn als vulstof uit Tabel 2.De figuur is op dezelfde manier gegenereerd als figuur 8, maar voor deze materiaalwaarden vallen praktisch alle faalmomenten voorbij de 200 jaar volgens het model

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

Op basis van een literatuurstudie kon een mathematisch-fysisch model voor langzame scheurgroei in de PVCU buiswand, inclusief de invloed van restspanning, geïntegreerd worden in Comsima. Hiermee hebben de drinkwaterbedrijven toegang tot een conditiemodel voor het primaire faalmechanisme van PVCU buizen.

Uit de literatuurstudie kwam ook naar voren dat de invloed van fysische veroudering op langzame scheurgroei niet voldoende bevestigd en beschreven is om een model op te baseren.

Uit een gevoeligheidsanalyse van het geïntegreerde model blijkt dat het scheurgroeiproces in een leiding primair zeer gevoelig is voor de omvang van de initiële imperfectie en de scheurgroeiparameters *A* en *m* en secundair voor de waterdruk en de restspanning. De gevoeligheid is zo groot dat een (meet)onzekerheid van enkele procenten in één invoerparameter reeds tot een onzekerheid van decennia in het voorspelde faalmoment. De materiaalparameters in kwestie zijn op dit moment grotendeels onbekend en onmogelijk of moeilijk op voorhand te meten, zodat het model - op dit moment - niet praktisch toepasbaar is om conditie of restlevensduur te voorspellen voor gebruik in beslissingsondersteunende software.

Ondanks de hoge gevoeligheid van het systeem voor de verschillende parameters blijkt dat er een samenspel van ongewoon hoge waarden binnen het praktische bereik van verschillende parameters nodig is voor voortijdig falen. Bij belangrijke storingen kan het model daarom benut worden in de analyse/evaluatie achteraf. Op dat moment kan voldoende informatie over het materiaal verzameld worden voor correct gebruik en kan het model gebruikt worden om te onderbouwen welke factoren een rol hebben gespeeld en welke maatregelen dus herhaling zouden kunnen voorkomen.

4.2 Aanbevelingen

Naar toepassing van dit model voor beslissingsondersteunende software

De primaire uitkomst van de ontwikkelede scheurgroeiberekening met Comsima is één moment van falen. De hoge gevoeligheid van de voorspelling van het faalmoment voor (meet)onzekerheden in parameters stelt aan de beschikbaarheid en precisie van data waar op dit moment niet aan kan worden voldaan. Nauwkeurige, deterministische restlevensduurvoorspelling vooraf is daarmee buiten bereik voor PVCU. Om beslissingsondersteunende vervangingsprogramma's te kunnen ondersteunen met een indicatie voor conditie zou wordt aanbevolen dit scheurgroeimodel te combineren met een stochastische aanpak.

In combinatie met Comsima's Monte-Carlomodule zou dit model gebruikt kunnen worden om te komen tot een waarschijnlijkheidsverdeling voor de restlevensduur. Vanwege de gevoeligheid van het scheurgroeiproces en de vooralsnog grote onzekerheid in materiaaleigenschappen zou dit weliswaar een zeer brede waarschijnlijkheidsverdeling opleveren, maar het zou de drinkwaterbedrijven wel toegang geven tot de kans dat de situatie van een leiding niet voldoet (bijvoorbeeld in de vorm van de waarschijnlijkheid dat de leiding vóór 100 jaar faalt). Zo kan beter worden omgegaan met de hoge gevoeligheid van het model: de onwaarschijnlijkheid van combinaties van hoge parameterwaarden wordt op waarde geschat waardoor schijnzekerheid wordt voorkomen.

Een eerste voorwaarde voor praktische toepassing van deze methode is het verzamelen van data, vanwege de hoge gevoeligheid van mechanische veroudering voor de verschillende parameters binnen hun praktische bereik. Het bepalen van de nieuwe invoermateriaalparameters kan een substantiële inspanning eisen, zeker als specifieke waarden voor verschillende deelgroepen van het PVCU leidingnet statistisch onderbouwd moeten worden bepaald. Het is ten eerste aan te bevelen om zoveel mogelijk relevante data op te vragen bij producenten. Naar alle waarschijnlijk, echter, zullen de drinkwaterbedrijven de benodigde data zelf moeten verzamelen via exitbeoordelingen van uitgenomen buizen (zoveel mogelijk gebruik makend van natuurlijke momenten om een buis uit te nemen, maar er voor wakend dat er niet enkel gekeken wordt naar de zwakste schakels die storen). Met betrekking tot dit model worden de volgende exitbeoordelingen aanbevolen:

- het bijhouden van de imperfecties die leiden tot falen (breukvlakinspecties);
- het bepalen van de scheurgroeiparameters A en m van Nederlandse buizen (mechanische beproeving);
- het bepalen van restspanningen (ringknipmeting, erg gemakkelijk zelf te doen).

Daarnaast is het aan te bevelen om de resultaten van metingen in opdracht van verschillende drinkwaterbedrijven zoveel mogelijk bij elkaar te brengen (ook voorbij de grenzen van de partijen die de metingen uitvoeren). Het zal een substantiële inspanning van de drinkwaterbedrijven vragen om data te verzamelen voor voldoende buizen (in de orde van grote 100 tot 1000, of meer als de variabiliteit in eigenschappen groot blijkt te zijn), qua tijd en geld (waarschijnlijk enkele duizenden euro's per buis). Het gestaag opbouwen van kennis via exitbeoordelingen is op dit moment echter een noodzakelijke voorwaarde voor het voeden van conditiemodellen, want op dit moment bestaan er voor deze parameters geen niet-destructieve meettechnieken die via mobiele inspectieplatformen inline zouden kunnen worden benut.

De volgende stap richting toepassing is om het stochastische model opnieuw te valideren. Ten eerste kan dit gedaan worden door te onderzoeken of de uitslagen correleren met storingsdata, zoals eerder beschreven door Wols en Moerman [2018]. Wanneer er beter zicht is op de materiaaleigenschappen van specifiek de buizen die in Nederland gebruikt zijn kan ter validatie ook onderzocht worden hoe goed het model in staat is om schadegevallen te emuleren.

Een mogelijke alternatieve aanpak

Een alternatieve aanpak zou kunnen zijn om af te stappen van het gedetailleerde scheurgroeimodel en in plaats daarvan te werken met de empirische relatie tussen de totale spanning en het faalmoment voor verschillende leidingcohorten, zoals wellicht bepaald zou kunnen worden met de methode uit Leoben [Balika en Lang, 2002; Pinter et al., 2007]. Een dergelijke relatie kan dan in Comsima geïmplementeerd worden op dezelfde manier als vergelijking 1. Via die aanpak zouden de gecombineerde effecten van *A*, *m*, *a*₀ en *K*_{IC} in één meting kunnen worden gevangen. Dit zou datavergaring, implementatie in Comsima én de vertaling naar een conditiegetal aanzienlijk eenvoudiger kunnen maken.

Deze aanpak lijkt daarmee veelbelovender dan de stochastische methode met het huidige model. Deze aanpak is echter wel afhankelijk van de meetmethode uit Leoben, die als exitbeoordeling zou moeten worden uitgevoerd om zicht te krijgen op de kwaliteit van verschillende groepen buizen. Het is op dit moment onduidelijk of deze methode toepasbaar is op uitgenomen buizen, dus het is aan te bevelen om de bruikbaarheid van de meetmethode uit Leoben voor PVCU drinkwaterbuizen te verkennen, om de kans van slagen van deze aanpak in te kunnen schatten.

Ontwikkeling van inspectietechnieken

Sensoren voor niet-destructieve inspectie van PVC leidingen zouden zich hoofdzakelijk moeten richten op het detecteren van bestaande scheuren die nog aan het groeien zijn, of zelfs op het detecteren van grote imperfecties, indien mogelijk. Het wordt aanbevolen om in een verkennend onderzoek uit te zoeken wat hiervoor veelbelovende

technieken zouden kunnen zijn. Sensoren die zich richten op het meten van fysische veroudering hebben mogelijk meerwaarde in het beoordelen van de slagvastheid van buizen, maar hun meerwaarde bij het beoordelen van de conditie onder quasi-statische belasting is onduidelijk.

Aanscherpen van dit model

In de geciteerde literatuur zijn op verschillende plaatsen mogelijkheden voor tweede orde correcties op het basis scheurgroeimodel gesuggereerd. Deze houden met name verband met een preciezere beschrijving van de incubatietijd, locatie en vorm van de scheur en met de spanning en vervorming van het materiaal daaromheen. Het wordt op dit moment niet aanbevolen om moeite te steken in dergelijke correcties, vóórdat validatie en toepassing van het model uitwijzen dat deze gewenst zijn.

In de literatuur is een duidelijke invloed van dynamische belastingen op scheurgroei beschreven. Aangezien Comsima alleen rekent met quasi-statische belastingen, is het aan te bevelen om de mogelijke rol van drukschommelingen en stoten op scheurgroei in kaart te brengen wanneer een mogelijke rol van dynamische belastingen binnen Comsima wordt onderzocht. Dynamische belastingen in Comsima zijn een onderwerp van onderzoek voor het geplande BTO van 2020 en 2021.

De scheurgroei in PE verloopt ruwweg op dezelfde wijze als in PVCU. Wanneer het huidige model voor PVCU valideerbaar en toepasbaar blijkt, kan overwogen om hetzelfde model te implementeren en toe te spitsen op PE in Comsima.

Het model houdt op dit moment rekening met de tangentiële spanningscomponenten in de buiswand. Het is denkbaar dat buigspanningen in andere richtingen, bijvoorbeeld vanwege puntbelasting maar mogelijk ook vanwege verkeers- of zettingsbelasting zouden scheurgroei kunnen beïnvloeden. Het is aan te bevelen om de ontwikkeling van inzichten en modellen op dit vlak in de gaten te houden, aangezien puntbelastingen en zettingen in de praktijk prominenten factoren in het voortijdige falen van leidingen lijken te zijn.

5 Referenties

Balika, W., Lang, R.W. (2002) Cracl growth in a pipe grade PVC material under static and cyclic loading conditions. Macromolecular Symposium 181:341-352.

Boersma A., Breen J. (2005) Long term performance prediction of existing PVC water distribution systems. TNO I – IX.

Breen J. (2006). Levensduurverwachting van bestaande PVC leidingen, Management samenvatting MT-RAP-06-18659/mso. TNO.

Beuken R.H.S., Mesman G.A.M. (2011) Kennissysteem levensduurbepaling. BTO 2011.113(s). KWR, Nieuwegein.

Burn, S., Davis, P., Schiller, T., Tiganis, B., Tjandraatmadja, G., Cardy, M., Gould, S., Sadler, P., and Whittle, A.J. (2006) Long-term performance prediction for PVC pipes. Technical report, Awwa research foundation, Denver.

Coules, H.E., Horne, G.C.M., Abburi Venkata, K., Pirling, T. (2018) The effect of residual stress on elastic-plastic fracture propagation and stability. Materials and Design 142:131-140.

Davis, P., Burn, L.S., Whittle, A.J. (2001) Investigating Crack Growth and Plasticity in the C-Ring Fracture Toughness Test. Proceedings of the 11th Plastic Pipes Conference, 3-6 September, Munich.

Davis, P., Burn, S., Moglia, M., Gould, S. (2007) A physical probabilistic model to predict failure rates in buried PVC pipelines. Reliability Engineering and Systems Safety 92:1258-1266.

Drenth, E. (2015) Towards condition based asset management of uPVC pipes. Proefschrift, Universiteit van Twente, Enschede.

Hutar, P., Sevcik, M., Nahlik, L., Pinter, G., Frank, A., Mitev, I. (2011) A numerical methodology for lifetime estimation of HDPE pressure pipes. Engineering Fracture Mechanics 78:3049-3058.

Hutar, P., Sevcik, M., Frank, A., Nahlik, L., Jaroslav, K., Pinter, G. (2013) The effect of residual stress on polymer pipe lifetime. Engineering Fracture Mechanics 108:98-108.

Janson, L.E. (1995) Long-term performance of buried PVC sewer pipes. 9th Plastic Pipes Conference, 18-21 September 1995, Edinburgh.

Kiwa (1965-2007) Kiwa keuringseisen en beoordelingsrichtlijnen:

- K49 (1965) Keuringseisen Nr. 49, Waterleidingbuizen van ongeplasticeerd 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) Leidingsystemen van PVC voor het transport van drinkwater en ruwwater.

Kiwa (2018) Schadeonderzoek en materiaalbeoordeling 315 mm PVC buis. GT-180078, Kiwa Technology B.V., Apeldoorn.

Laham, S.A.I. (1998) Stress intensity factor and limit load handbook. British Energy Generation Ltd. London.

Lu, J.P., Davis, P., and Burn, L.S. (2003) Lifetime prediction for ABS pipes subjected to combined pressure and deflection loading. Polymer Engineering and Science 43:444–462.

Makris, K.F., Langeveld, J., Clemens, F.H.L.R. (2019) A review on the durability of PVC sewer pipes: reserach vs. practice. Structure and Infrastructure Engineering. DOI: 10.1080/15732479.2019.1673442

Mesman G.A.M., van Laarhoven, K.A. (2018) Kennisregels PVC leidingen, update 2017. BTO 2018.009. KWR, Nieuwegein.

Pinter, G., Lang, R.W., Haager, M. (2007) A test concept for lifetime prediction of polyethylene pressure pipes. Monatshefte fur Chemie 138:347-355.

Poduska, J., Kucera, J., Hutar, P., Sevcik, M., Krivanek, J., Sadilek, J., Nahlik, L. (2014) Residual stress distribution in extruded polypropylene pipes. Polymer Testing 40:88-98.

Poduska, J., Hutar, P., Kucera, J, Frank, A., Sadilek, J., Pinter, G., Nahlik, L. (2016) Residual stress in polyethylene pipes. Polymer Testing 54:288-295.

Struik, L.C.E. (1977) Physical aging in amorphous polymers and other materials. Proefschrift, Technische Universiteit Delft, Delft.

van Laarhoven, K.A., van Vossen, J., Hillebrand, B. (2019) Beoordeling van methodieken voor het voorspellen van toekomstige storingsfrequenties: resultaten van een pilot met AC. BTO 2019.50, KWR, Nieuwegein.

Visser, H.A. (2009) Residual lifetime assessment of UPVC gas pipes. Proefschrift, Universiteit van Twente, Enschede.

Withers, P.J. (2007) Residual Stress and its role in failure. Reports on Progress in Physics 70:2211-2264.

Wols B.A., Moerman A. (2015) COMSIMA: model voor spanningen op ondergrondse leidingen. BTO 2015.206(S). KWR, Nieuwegein.

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

Wols, B.A., Moerman, A. (2018) Spanningen en storingsfrequenties voor drinkwater- leidingen van PWN. KWR 2018.016. KWR, Nieuwegein.

Zhang, X., Cheng, X., Stelson, K.A., Bhattachary, M., Sen, A., Voller, V.R. (2002) Approximate model of thermal residual stress in an injection molded part. Journal of Thermal Stresses, 25:523-538.

Appendix I

Log of modifications to Comsima.

The following is a qualitative summary of the main changes applied to Comsima to implement the models described in chapter 2. All changes were made in version 15 of Comsima. Specific parts of the code mentioned here, such as the names of variables and libraries are marked in blue.

1.1 Input variables

Introduced new model input parameters in:

- Configuration_file.py in the function configuration_settings()
- Configuration_file.py in the function load_settings() under default values
- classModel.py in the method ObjPipe.__init__() under self.parameters and self.units

Input parameters added to the pipe object:

- initial defect size scg_a0
- short term critical stress intensity factor scg Kic short
- scg_Kic_time_exponent short term critical stress intensity factor time evolution
- material parameter controlling slow crack growth (scg) scg_A
- material parameter controlling scg scg m
- sigma tan long residual³ residual tangential stress at the inner pipe surface

1.11 Controls

Added flags in the configuration file for:

- taking residual stress into account for PVC or not:
- calculation of crack growth or not⁴:
- flagResidualstress flagSlowcrackgrowth

1.111 Model steps

Introduced separate variables to be saved in the mod object for the individual contributions to the tangential stress (water pressure, vertical load, residual stress) in fun calc.f sigma tan():

- self.sigma tan long pressure calculated as •
- self.sigma_tan_long_verticalload calculated as

f sigma pressure(pipe) f rr*Kb*self.Qtot long*rg/Wt pipe.sigma_residual⁵

self.sigma_tan_long_residual calculated as

Basically, the third rule is all that is needed to implement residual stress in the crack growth model.

⁴ Calculation of the crack growth will not influence other parts of the model, but may take up a lot of time for large amounts of repetitions and time steps.

³ OPEN: This one will be rarely known on beforehand until a good sensor is implemented; a well substantiated default value and (in the future) distribution of possible default values for MC is essential.

⁵ OPEN: This one could subsequently be made time dependent as a next order approximation; the residual stress relaxes over time, but most of this occurs in the 1st year according to Janson (1995).

Added several new functions to the fun_aging.py library that handle the crack growth, based on the added input, the individual components of the 'static' global stress, and the predefined geometric factors for the stress intensity factors. The following functions were added:

- rules_scg_LEFM_Y(rcs), this function returns the geometric factors for the stress intensities dues to, respectively, internal loading, vertical loading and residual stress, as a function of the relative crack size, rcs.
- rules_scg_LEFM_Kic(mod,pipe), this function generates the time dependent critical stress intensity factor (the fracture toughness) for each timestep in the simulation and stores it in the mod object as the variable scg_Kic
- calc_scg_LEFM_Ktot(mod,pipe,i_cur), this function calculates the total stress intensity factor around the crack for a given timestep, i_cur, and returns it
- calc_scg_LEFM_crackprogression(mod,pipe), this function calls the other functions mentioned above to evaluate the crack growth throughout the simulation (for all Monte Carlo repetitions at once).

In the fun_MC.py library, modified the function calc() to call calc_scg_LEFM_crackprogression(mod,pipe), but only called when the aging- & crack growth flags in the configuration file are set to True and the material is PVC.

I.IV Visualization

Created the fun_plot_scg.py library with several functions to visualize the results of the sensitivity study.