

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

Bedrijfstakonderzoek
BTO 2022.049 | September 2022

Storingsvoorspelling voor individuele leidingen met Comsima

Bedrijfstakonderzoek

KWR

Bridging Science to Practice

Rapport

Storingsvoorspelling voor individuele leidingen met Comsima

BTO 2022.049 | September 2022

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

Opdrachtnummer

402045-168

Projectmanager

Petra Holzhaus

Opdrachtgever

BTO - Thematisch onderzoek - Distributie

Auteur(s)

dr. ir. K.A. (Karel) van Laarhoven; dr.ir. B.A. (Bas) Wols

Kwaliteitsborger(s)

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

Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.

Een jaar na publicatie is het openbaar.

Keywords

Distributie, assetmanagement, conditiemodellen, storingsen

Jaar van publicatie

2021

Meer informatie

dr. ir. Karel van Laarhoven

T +3130 6069697

E karel.van.laarhoven@kwrwater.nl

PO Box 1072

3430 BB Nieuwegein

The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511

F +31 (0)30 60 61 165

E info@kwrwater.nl

I www.kwrwater.nl

KWR

Augustus 2021 ©

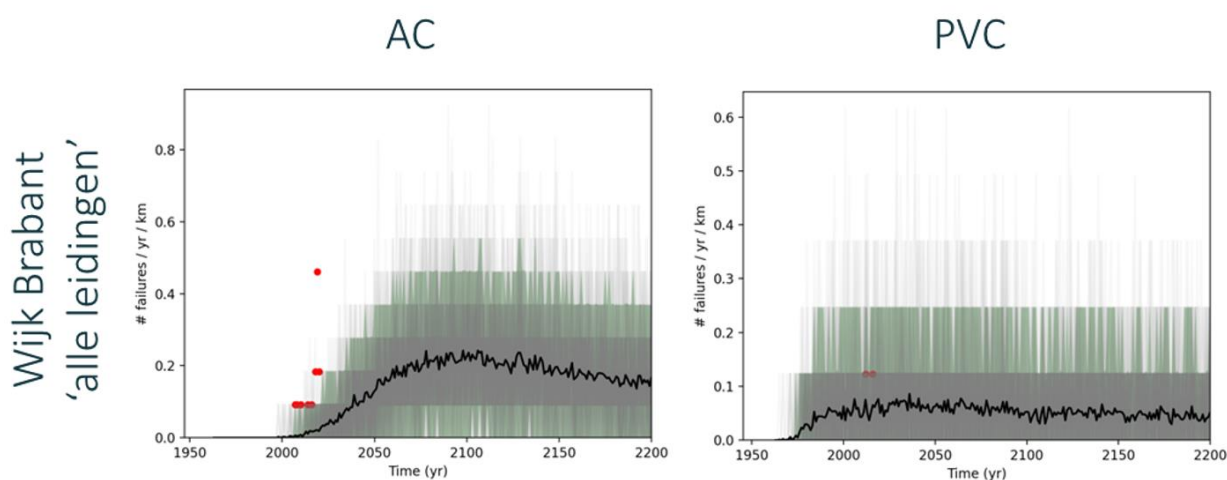
Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen,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

Managementsamenvatting

Storingsvoorspelling voor individuele leidingen met Comsima

Auteur(s) dr. ir. K.A. (Karel) van Laarhoven; dr.ir. B.A. (Bas) Wols.

In dit onderzoek is een methode uitgewerkt en geïmplementeerd in Comsima – het leidingconditiemodel dat wordt ontwikkeld in het BTO – waarmee de tijdsafhankelijke storingsfrequentie van kleine leidingssystemen op zuivere wijze kan worden gesimuleerd. Toepassing van de methode op enkele pilot-gebieden laat zien dat de modeluitkomsten redelijk overeenkomen met gemeten storingsdata. De beperkte beschikbaarheid van de benodigde invoerdata leidt echter tot grote onzekerheden in de modeluitkomsten en tot een beperking van de mogelijkheid om verschillen tussen leidingen via het model bloot te leggen. Databeschikbaarheid zal daarmee in de nabije toekomst het absolute knelpunt zijn voor conditiebepaling en -voorspelling op basis van modellen voor alle individuele leidingen in een gebied.



Leeftijdsafhankelijke storingsfrequenties van de AC en PVC leidingen in een case study gebied. De zwarte lijn geeft de gemiddelde storingsfrequentie; de grijze lijnen geven een indicatie van de spreiding die rond het gemiddelde verwacht mag worden. De rode punten geven de storingsfrequenties in de jaren dat voor dit gebied storings werden geregistreerd

Belang: toegespitste vervangingsbeslissingen

Drinkwaterbedrijven baseren beslissingen over het al dan niet vernieuwen van een leiding onder andere op het risico van storen. Drinkwaterbedrijven gebruiken beslissingsondersteuningssoftware (BOS) om het risico op storing af te leiden uit, onder andere, de kans op storen. De kans op het storen van een bepaalde leiding wordt typisch afgeleid uit het collectieve storingsgedrag van vergelijkbare leidingen, waarvan jaarlijks het aantal storings wordt geregistreerd. Er is bij de drinkwaterbedrijven

echter steeds meer de wens om de storingskans te kunnen relateren aan de specifieke situatie van individuele leidingen. Onder andere in de energietransitie zal dit waardevol zijn, waarin naar verwachting veel vaker de vraag zal komen om wel of niet werkzaamheden te combineren met derden.

Aanpak: een conditiemodel toegespitst op individuele leidingen

In dit onderzoek is een methode uitgewerkt en geïmplementeerd in Comsima waarmee de

tijdsafhankelijke storingsfrequentie van kleine leidingsystemen op zuivere wijze kan worden gesimuleerd. De belangrijkste vragen liggen rond een goede vertaling van modeluitkomsten naar een (actuele of toekomstige) storingskans, de beschikbaarheid van invoerdata, en de manier waarop de resultaten in de praktijk gebruikt kunnen worden om besluitvorming verder te helpen.

Resultaten: een eerste pilot met toegespitste conditiebepaling leidt onder databeschikbaarheid

Toepassing van de methode op enkele pilot-gebieden laat zien dat de modeluitkomsten redelijk overeenkomen met gemeten storingsdata. De beperkte beschikbaarheid van de benodigde invoerdata leidt echter tot grote onzekerheden in de modeluitkomsten en tot een beperking van de mogelijkheid om verschillen tussen leidingen via het model bloot te leggen. Databeschikbaarheid zal daarmee in de nabije toekomst het absolute knelpunt zijn voor conditiebepaling en -voorspelling op basis van modellen voor alle individuele leidingen in een gebied.

Toepassing: de toegespitste modellen moeten nu wachten op toegespitste dataverzameling

Als de sector een stap verder wil komen met conditiemodellen, dan kunnen we er niet omheen om meer data over het leidingnet te verzamelen en te bewaren. Vanuit de KSLB/Comsima onderzoekslijn tot nu toe wordt daarin de volgende prioritering aanbevolen:

1. diepteligging en wanddikte van de leidingen;
2. uitlogingssnelheid (AC) en Weerstand tegen Langzame Scheurgroei (PVC);
3. druk, verschilzettingen, bodem/beddingseigenschappen;
4. (incidentele belastingen; niet aan bod gekomen in dit onderzoek)

Een programma/proces binnen de bedrijfsvoering om dergelijke informatie structureel te verzamelen is aan te bevelen. Deze opgave is niet aan te bevelen als iets 'voor de monteur voor erbij'; datavergaring is een grote opgave die waarschijnlijk eigen aandacht en training vereist.

Het Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Storingsvoorspelling voor individuele leidingen met Comsima* (BTO-2022.049).

Meer informatie

dr. ir. Karel van Laarhoven
T +3130 6069697
E karel.van.laarhoven@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands



Inhoud

Managementsamenvatting	3
Inhoud	6
1 Inleiding	7
1.1 Aanleiding en doel	7
1.2 Opbouw en leeswijzer	7
2 Modelaanpak	8
2.1 Inleiding	8
2.2 Bouwstenen voor het rekenen aan het storingsgedrag van individuele leidingen	8
2.2.1 Fysische modellen	8
2.2.2 Kernuitkomst: een conditiegetal per leidingsegment	9
2.2.3 Rekenen aan onzekerheid in het conditiegetal	9
2.2.4 Rekenen aan toekomstige veranderingen in het conditiegetal	11
2.2.5 Rekenen aan het storingsgedrag van groepen leidingen	11
2.3 Invoerdata	11
2.4 Uitbreiding van Comsima voor storingsvoorspelling voor individuele leidingen	11
3 Case studies	13
3.1 Inleiding	13
3.2 aanpak	13
3.2.1 Pilot gebieden	13
3.2.2 Invoerdata	13
3.2.3 Berekeningen	16
3.3 Resultaten	16
3.3.1 Levensduurverdelingen per segment	16
3.3.2 Storingsfrequenties per gebied	17
3.3.3 Gevoeligheden in het model	19
3.4 Discussie	21
4 Conclusies, bedrijfsparagraaf en aanbevelingen	22
4.1 Conclusie	22
4.2 Bedrijfsparagraaf	22
4.3 Aanbevelingen	22
5 Referenties	24
I Benodigde invoergegevens voor Comsima	25

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doel

Drinkwaterbedrijven baseren beslissingen over het al dan niet vernieuwen van een leiding onder andere op het risico van storen. Het risico wordt bepaald door zowel de kans dat de leiding stoort als het effect dat het storen van de leiding heeft. Drinkwaterbedrijven maken daarbij gebruik van beslissingsondersteuningssoftware (BOS) die informatie over leiding en omgeving aggregeren tot kans, effect en uiteindelijk risico.

In de huidige aanpak wordt de kans op het storen van een bepaalde leiding typisch afgeleid uit het collectieve storingsgedrag van vergelijkbare leidingen, cohorten, waarvan jaarlijks het aantal storingen wordt geregistreerd. Er is bij de drinkwaterbedrijven echter steeds meer de wens om de storingskans te kunnen relateren aan de specifieke situatie van individuele leidingen, onder andere in verband met de energietransitie, waarin naar verwachting veel vaker de vraag zal komen om wel of niet werkzaamheden te combineren met derden.

Eén methode om te komen tot een toegespitste uitspraak over een specifieke leiding is het gebruik van conditiemodellen: fysische modellen die op basis van een parametrische beschrijving van leiding en omgeving de toestand van de leiding berekenen in relatie tot de technische grenzen die deze toestand mag bereiken. Een dergelijk model kan op meerdere plaatsen bijdragen aan het beslissingsproces, zoals het vooraf inschatten van storingskansen, nadere analyse van een geprioriteerde leiding, of het ondersteunen van een analyse van storingsoorzaken achteraf.

In het conditiemodel Comsima worden de inzichten uit BTO-onderzoek naar leidingconditie samengebracht (Wols *et al.*, 2015). Comsima benadert de conditie van een leiding via spanningsberekeningen op basis van leidingspecificaties, geo-informatie en kennisregels voor veroudering (Wols en Moerman, 2017). Verschillende bedrijven testen sinds 2020 een eerste toepassing van de basisversie van Comsima in hun BOS. Dat doen ze door de berekende conditie te gebruiken als benadering voor storingskansen. In het recente BTO is onderzocht hoe dit model gecombineerd kan worden met onzekerheden in modelparameters om daadwerkelijke storingskansen en toekomstig storingsgedrag van groepen leidingen te modelleren (van Vossen en van Laarhoven, 2017; van Laarhoven en van Vossen, 2019).

In het voorliggende rapport wordt op het eerdere onderzoek – naar het storingsgedrag van groepen – voortgebouwd, met als doel het storingsgedrag van een individuele leiding (opgebouwd uit meerdere segmenten) te kunnen modelleren. De belangrijkste vragen liggen rond een goede vertaling van modeluitkomsten naar een (actuele of toekomstige) storingskans, de beschikbaarheid van invoerdata (ook onderzocht in het bovengenoemde onderzoek) en de manier waarop de resultaten in de praktijk gebruikt kunnen worden om besluitvorming verder te helpen.

1.2 Opbouw en leeswijzer

Om toe te kunnen lichten hoe de modellering van het storingsgedrag van individuele leidingen is opgebouwd, wordt in Hoofdstuk 2 eerst een overzicht gegeven van de bouwstenen die hiertoe al eerder in het BTO zijn ontwikkeld. Vervolgens wordt in dat hoofdstuk ook de voor dit onderzoek ontwikkelde uitbreiding van Comsima toegelicht waarmee het storingsgedrag van individuele leidingen kan worden voorspeld. In Hoofdstuk 3 wordt deze methode toegepast op een aantal gebieden van Brabant Water en Evides. De modeluitkomsten worden vergeleken met historische storingsdata en de belangrijkste gevoeligheden in het model worden onderzocht. Hoofdstuk 4 geeft de conclusies en aanbevelingen die volgen uit dit onderzoek.

2 Modelaanpak

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt toegelicht hoe het storingsgedrag van individuele leidingen is gemodelleerd, voortbouwend op de verschillende deelmodellen binnen Comsima die eerder in het Bedrijfstakonderzoek zijn ontwikkeld. Eerst worden de bestaande deelmodellen kort toegelicht, daarna wordt beschreven hoe deze modellen zijn samengebracht en uitgebreid om de conditie van individuele leidingen te berekenen, en hoe dit kan worden vertaald naar toekomstig storingsgedrag.

2.2 Bouwstenen voor het rekenen aan het storingsgedrag van individuele leidingen

2.2.1 Fysische modellen

De kern van Comsima is een model dat de werking van verschillende belastingen op een leidingdeel (benaderd als een keten van buisdelen en verbindingen) berekent aan de hand van gevestigde mechanische modellen uit de civiele techniek. Er worden twee gevolgen van deze belastingen gemodelleerd:

- **Spanning in de buiswand** - de belastingen veroorzaken verschillende spanningen in de langs- en omtrekriching van de buiswand. De spanningen worden per richting bij elkaar opgeteld, zodat er in beide richtingen een totaalspanning wordt berekend. Vervolgens worden de spanningen in beide richtingen gecombineerd volgens een Von Mises criterium. De resulterende Von Mises spanning kan worden vergeleken met de bezwijkspanning van het leidingmateriaal. De leiding zal falen (via het scheuren van de leidingwand) als de bezwijkspanning wordt overschreden.
- **Hoekverdraaiing in de verbindingen** - de belastingen kunnen leiden tot vervorming van het leidingsysteem. Eén gevolg van de vervorming is het doorbuigen van de buisdelen. Dit resulteert in een buigspanning die in de bovengenoemde spanningsberekening wordt meegenomen. De vervorming leidt echter ook tot hoekverdraaiing van buisdelen ten opzichte van elkaar, waardoor de verbindingen daartussen extra worden belast. Uit de gemodelleerde vervorming wordt de hoekverdraaiing van verbindingen gemodelleerd. Deze hoekverdraaiing kan worden vergeleken met de maximaal toelaatbare hoekverdraaiing. De verbinding zal falen (via lekkage van de afdichting of via het scheuren van de verbinding) wanneer de maximaal toegestane hoekverdraaiing wordt overschreden. Het uitschuiven van verbindingen wordt niet gemodelleerd.

Tabel 1 somt op welke belastingen worden gemodelleerd, inclusief verwijzingen naar bronnen waarin deze modellen nader worden beschreven. Daarnaast worden de opbouw en samenhang van deze modellen verder beschreven in Wols *et al.* (2015).

Tabel 1. Deelmodellen in Comsima en hun oorsprong.

Deelmodel	Bron
Interne druk, ketelspanning	NEN 3650-1:2003 D.1.1
Interne druk, dwarscontractie	NEN 3650-1:2003 D.1.3.1
Bovenbelasting door de bodem	NEN 3650-1:2003 D.3.1,
Belasting door gewicht van buis en inhoud	NEN 3650-1:2003 C.4.2.2
Opdrijving door grondwater	NEN 3650-1:2003 C.6
Bovenbelasting door verkeer	NEN 3650-1:2003 C.4.2.2 NEN 3650-1:2003 C.5
Buigbelasting door verschilzettingen in de bodem	Wang <i>et al.</i> (2011)
Hoekverdraaiing door verschilzettingen in de bodem	Wols <i>et al.</i> (2015)

2.2.2 Kernuitkomst: een conditiegetal per leidingsegment

De bovengenoemde modellen worden gebruikt om de grootste spanning en hoekverdraaiing die optreden in een leidingdeel te berekenen. Deze worden vertaald naar een maat voor de conditie van het leidingdeel in de vorm van een conditiegetal: de spanning en hoekverdraaiing worden eerst genormaliseerd op respectievelijk de vloeispanning van het leidingmateriaal en de maximaal toelaatbare hoekverdraaiing. De genormaliseerde spanning en hoekverdraaiing hebben dus waarde 0 als het leidingdeel volkomen onbelast is, en waarde 1 of hoger als de bijbehorende grenswaarde wordt overschreden. Het conditiegetal wordt vervolgens gedefinieerd als het maximum van beide genormaliseerde waarden:

$$C = \max\left(\frac{\sigma_{mises}}{\sigma_f}, \frac{\theta}{\theta_{max}}\right)$$

Met C het conditiegetal, σ_{mises} de hoogste Von Mises spanning in het leidingdeel, θ de grootste hoekverdraaiing in het leidingdeel, σ_f de faalspanning van het leidingmateriaal en θ_{max} de maximaal toelaatbare hoekverdraaiing van de verbindingen in het leidingdeel.

In voorgaande studies is de relatie van dit conditiegetal met de daadwerkelijke conditie van leidingdelen getoetst door te kijken naar de storingsfrequenties van groepen leidingen met hetzelfde conditiegetal. Dergelijke studies zijn uitgevoerd bij Oasen, PWN, Brabant Water en Evides. De studie bij Oasen is in meer detail beschreven in *Wols et al.* (2015) en de studie bij PWN is in meer detail beschreven in (Moerman, 2018). De studies bij Brabant Water en Evides hadden dezelfde opzet als de studie bij PWN, maar zijn uitgevoerd binnen de kaders van de eigen bedrijfsvoering en zijn gerapporteerd in interne documenten (Drevijn, 2020; van den Ende, 2020). De uitkomsten op hoofdlijnen staan afgebeeld in Figuur 1.

De uitkomsten in Figuur 1 laten geen duidelijk bewijs zien: in enkele gevallen (PWN PVC, PWN AC, Evides PVC, Brabant Water AC) is er een ruwe relatie tussen conditiegetal en storingsfrequente zichtbaar, hoewel de onzekerheidsmarge van de uitkomsten voor de extremere conditiegetallen groot is vanwege het lage aantal kilometers van leidingen met een dergelijke conditie. In een aantal andere gevallen (Evides AC, Brabant Water PVC) is er geen relatie zichtbaar. Ook valt op dat er substantiële verschillen in storingsfrequenties tussen de bedrijven zijn.

2.2.3 Rekenen aan onzekerheid in het conditiegetal

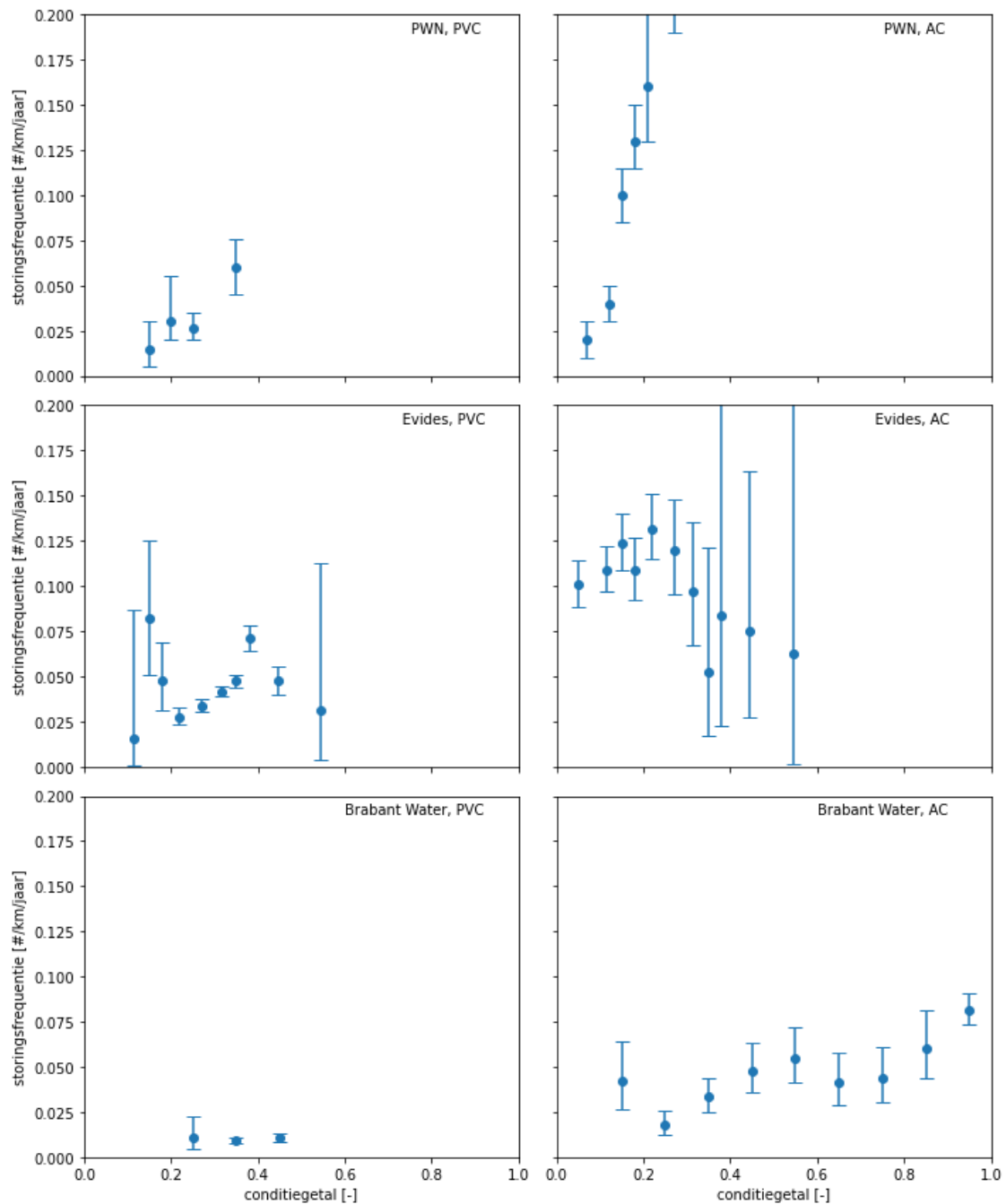
Het uitrekenen van het conditiegetal biedt dus de mogelijkheid om een eerste inschatting te maken van de conditie van een leidingdeel op basis van beschikbare informatie. Het is daarbij belangrijk er op te letten dat de modeluitkomsten op zijn best zo betrouwbaar zijn als de betrouwbaarheid van de invoer van het model. Het is daarom wenselijk om een goede inschatting te kunnen maken in de onzekerheid die moet worden toegekend aan het berekende conditiegetal. Om die reden is voor Comsima een module opgezet die met behulp van Monte Carlo-methoden een spreiding in invoerdata kan vertalen naar een spreiding in mogelijke uitkomsten. De opzet van de Monte Carlo-module is in meer detail beschreven in *Wols en Moerman (2017)* en in *van Laarhoven en van Vossen (2019)*.

Monte Carlo-methoden vormen een zeer algemene, krachtige, statistische aanpak om spreiding in modelinvoer te vertalen naar spreiding in modeluitvoer. Deze aanpak wordt in wetenschap en industrie breed toegepast voor bijvoorbeeld gevoeligheidsanalyses en voor het in kaart brengen van onzekerheden. De betekenis van de berekende spreiding in het conditiegetal hangt af van de betekenis van de spreiding in de invoer waaraan gerekend wordt. Hieronder twee voorbeelden:

1. **Onzekerheid:** wanneer de spreiding in de invoer de (meet)onzekerheden in de eigenschappen van een specifieke buis representeert, representeert de spreiding in de uitvoer de onzekerheid in conditie van die

buis. Het aandeel van de spreiding in het conditiegetal dat boven het faalcriterium ligt (waarde > 1) representeert dan de kans dat de leiding binnenkort stort.

2. **Variatie in een cohort:** wanneer de spreiding in de invoer de spreiding van leideigenschappen binnen een bepaalde groep leidingen representeert, representeert de spreiding in de uitvoer de spreiding van de condities die binnen de groep mag worden verwacht. Het aandeel van de spreiding in het conditiegetal dat boven het faalcriterium ligt (waarde > 1) representeert dan het aandeel van de leidingen binnen de groep waarvan verwacht mag worden dat deze binnenkort zal storen.



Figuur 1. Uitkomsten van studies naar de relatie tussen het conditiegetal van Comsima en het storingsgedrag van leidingdelen bij verschillende waterbedrijven: PWN, Evides en Brabant Water. In iedere figuur is de gemiddelde storingsfrequentie van groepen leidingen met vergelijkbaar conditiegetal uitgezet tegen dat conditiegetal. De banden geven het 95% betrouwbaarheidsinterval van de gemiddelde storingsfrequenties, wat wordt bepaald door het aantal storingen en het aantal kilometers leidingen waarop de specifieke waarde is gebaseerd (zie ook Beuken en Moerman, 2017).

2.2.4 Rekenen aan toekomstige veranderingen in het conditiegetal

Veranderende omstandigheden leiden tot veranderingen in conditie. Om die reden is in Comsima een verouderingsmodule opgezet die veranderingen in de leiding en de omgeving als functie van de tijd vertalen naar veranderingen in de conditie als functie van de tijd. Kennisregels uit het KSLB (een voorganger van Comsima) – voor de degradatie van de wanddikte van AC; voor verpotloding van de wand van grijs gietijzer; en voor de weerstand tegen langzame scheurgroei van PVC – zijn in de verouderingsmodule geïntegreerd om het verouderingsgedrag in te schatten wanneer er geen directe metingen beschikbaar zijn. De verouderingsmodule is in meer detail beschreven in (Wols en Moerman, 2017).

2.2.5 Rekenen aan het storingsgedrag van groepen leidingen

Door de verouderingsmodule (2.2.4) te combineren met de Monte Carlo-module (2.2.3) kan er worden gerekend aan hoe de kans dat de conditie van een leiding voldoet verandert in de tijd. In eerder BTO onderzoek (van Vossen en van Laarhoven, 2017) is uitgewerkt hoe hiermee een inschatting gemaakt kan worden van het verloop in de tijd van de spreiding in de condities van alle leidingen binnen een cohort (voorbeeld 2 in 2.2.3). Door het aandeel van ondermaatse condities door de tijd te volgen tot aan het punt dat geen van de condities binnen het cohort meer voldoet, wordt een overlevingscurve van het cohort benaderd. Uit die overlevingscurve kunnen vervolgens zaken zoals het storingsgedrag van het gehele cohort als functie van de tijd worden benaderd.

Een case study bij Brabant Water liet een redelijke overeenkomst zien tussen model en storingsdata (van Laarhoven en van Vossen, 2019). Het is echter belangrijk om te benadrukken dat een kernaanname binnen deze aanpak was dat de gecombineerde lengte van de storende segmenten verwaarloosbaar veel kleiner is dan de totale lengte van het cohort. Wanneer geprobeerd wordt om het storingsgedrag van een enkele leiding te modelleren, gaat deze aanname niet meer op. Om daar mee om te gaan is een aangescherpte aanpak nodig, die verderop wordt beschreven in paragraaf 2.4.

2.3 Invoerdata

De deelmodellen in 2.2.1 zijn afhankelijk van invoerparameters die de leiding, de operatie, en de omgeving waarin deze ligt zo goed mogelijk beschrijven (denk aan zaken zoals buisdiameter, waterdruk, of bodemdichtheid). Als er gebruik gemaakt wordt van de verouderingsmodule, zijn er daarnaast ook invoerparameters nodig die de verandering in de omstandigheden beschrijven (denk aan de snelheid waarmee verschildzettingen ontstaan of de snelheid waarmee de wand van een AC leiding uitlooft), of – als deze niet beschikbaar zijn – invoerparameters op basis waarvan deze kunnen worden ingeschat (zoals bodemtype en de aanwezigheid van een coating op de leiding). Wordt er gebruik gemaakt van de Monte Carlo-module, dan is er bovendien voor iedere invoerparameter informatie nodig over de spreiding/onzekeerheid in de waarde waarmee rekening gehouden moet worden. Hoe beter de waarden van al deze invoer kan worden gebaseerd op de gemeten of geregistreerde kenmerken van de leiding/omgeving die wordt doorgerekend, hoe beter de inschatting van de conditie. In Tabel 4 in Bijlage I zijn alle invoerparameters van het model samengevat.

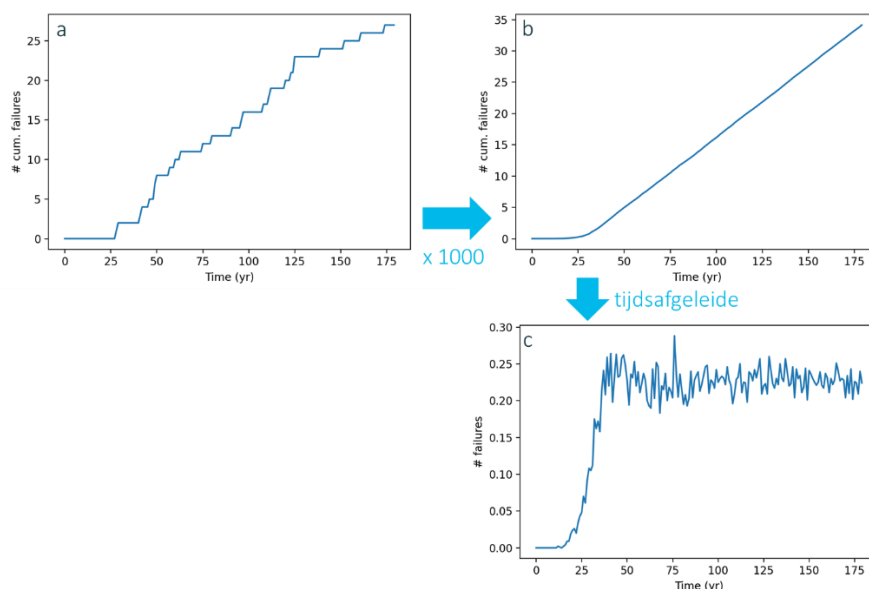
2.4 Uitbreiding van Comsima voor storingsvoorspelling voor individuele leidingen

Wanneer het storingsgedrag van een enkele leiding wordt gemodelleerd, kan er niet zonder meer van uit worden gegaan dat de verandering van het systeem vanwege de storing verwaarloosbaar is. Het grootste deel van de leiding blijft weliswaar onveranderd, maar er moet rekening mee worden gehouden dat de leiding na iedere storing gerepareerd wordt. Die reparatie houdt in dat een klein gedeelte van de leiding nieuwe eigenschappen krijgt (een jongere leeftijd en wellicht zelfs een nieuw materiaal). Om hier goed mee om te gaan moet de zogenaamde *statistiek voor repareerbare systemen* worden toegepast (NIST, 2012), als uitbreiding op de *statistiek voor niet-repareerbare systemen* die ten grondslag ligt aan de aanpak beschreven in Paragraaf 2.2.5. Deze statistiek is als volgt in Comsima geïmplementeerd:

- a De te modeleren leiding wordt opgedeeld in kleine leidingsegmenten. Bij voorkeur komt de lengte van deze segmenten zo goed mogelijk overeen met de lengte die gerepareerd wordt bij een lekkage. De te modeleren leiding is het *repareerbare systeem*, dat is opgebouwd uit een verzameling, in serie geschakelde *niet reparerbare onderdelen* (de aanname is dus dat, om de leiding te repareren, een van de segmenten wordt vervangen).
- b Voor ieder van de segmenten in de leiding wordt – met behulp van een aparte Comsima Monte Carlo-berekening – een kansdichtheidsverdeling voor de levensduur berekend (volgens de aanpak van Paragrafen 2.2.3 en 2.2.5, voorbeeld 1). Omdat de omstandigheden van ieder segment kunnen verschillen (het ene segment ligt bijvoorbeeld dicht bij een weg dan het andere), kunnen de levensduurverdelingen ook verschillend zijn.
- c Met behulp van deze voorbereiding wordt vervolgens de ‘storingsgeschiedenis’ van de leiding gesimuleerd in de vorm van het cumulatieve aantal storingsen dat optreedt in de tijd. Bij aanvang wordt voor alle segmenten het moment van falen willekeurig getrokken uit de bijbehorende kansdichtheidsverdeling en onthouden. Op het tijdstip van de eerste storing (de laagst getrokken levensduur) gebeurt er het volgende:
 - 1 het bijgehouden cumulatieve aantal storingsen wordt met 1 opgehoogd;
 - 2 het segment wordt ‘gerepareerd’: er wordt een nieuw moment van falen – gemeten vanaf dit moment van falen – getrokken uit de (eventueel aangepaste) levensduurverdeling. Het nieuwe moment van falen wordt net als de faalmomenten van de overige segmenten onthouden. Er moet bijvoorbeeld met een aangepaste kansverdeling gewerkt worden wanneer het storende segment AC betreft, en het segment gerepareerd wordt door het te vervangen met PVC;
 - 3 de simulatie wordt voortgezet richting het eerstvolgende faalmoment in de verzameling en gaat weer verder met stap 1.

Een voorbeeld van het op deze manier gesimuleerde cumulatieve aantal storingsen op de leiding als functie van de tijd is afgebeeld in Figuur 2a.

- d De simulatie van stap c wordt een groot aantal keer herhaald zodat het gemiddelde cumulatief aantal storingsen dat in de tijd verwacht mag worden wordt verkregen. Dit is afgebeeld in Figuur 2b.
- e In de statistiek voor reparerbare systemen wordt de afgeleide van het gemiddelde cumulatief aantal storingsen ook wel de *repair rate* of de *Rate Of Occurence Of Failures (ROCOF) at time t* genoemd (NIST, 2012). Deze curve geeft per tijdstap het aantal storingsen dat in die tijdstap typisch optreedt: de te verwachten storingsfrequentie. Deze eindstap is afgebeeld in Figuur 2c.



Figuur 2. Illustratie van het proces waarmee de leeftijdsafhankelijke storingsfrequentie van een leiding kan worden gesimuleerd. (a) een cumulatieve storingsgeschiedenis wordt gesimuleerd op basis van leeftijdsverdelingen per segment. (b) de storingsgeschiedenis wordt meermaals gesimuleerd en de uitkomsten worden gemiddeld. (c) de afgeleide van dit gemiddelde geeft de ROCOF: de storingsfrequentie van de leiding als functie van de leeftijd.

3 Case studies

3.1 Inleiding

De in Hoofdstuk 2 beschreven methode is toegepast op een aantal gebieden van Brabant Water en Evides. Voor ieder gebied is op basis van de beschikbare data een berekening gemaakt van het te verwachten storingsgedrag. Deze uitkomsten worden vervolgens ter validatie vergeleken met historische storingsgegevens. Tijdens deze case studies werd met de projectgroep expliciet aandacht besteed aan drie vragen:

- is er voldoende invoerdata beschikbaar voor een goede berekening?
- Komen de modeluitkomsten overeen met de historische storingsgegevens?
- Kunnen de modeluitkomsten qua vorm makkelijk worden opgenomen in de besluitprocessen van de drinkwaterbedrijven?

3.2 Aanpak

3.2.1 Pilot gebieden

Evides heeft data aangeleverd van twee wijken: Westwijk Vlaardingen en Overschie. Brabant Water heeft data aangeleverd voor een niet nader genoemde wijk in Den Bosch, die is opgedeeld in twee deelgroepen: alle leidingen die in de wijk gelegen hebben, en de deelgroep van die leidingen die inmiddels uit bedrijf genomen zijn. In ieder gebied zijn meerdere leidingmaterialen aanwezig; de berekeningen hebben zich gericht op het aanwezige PVC en AC.

Per gebied is ook storingsdata aangeleverd. Evides heeft storingen vanaf 2004 geregistreerd, Brabant Water vanaf 2007. Omdat Comsima alleen het falen via belasting (spanning) en vervorming (hoekverdraaiing) modelleert, zijn de storingen eerst gefilterd op de faalwijzen die niks met spanning of hoekverdraaiing te maken hebben (bijvoorbeeld storingen door derden, maar bijvoorbeeld ook wortelingroei en het uitschuiven van verbindingen). Voor de wijk van Brabant Water werden op die manier 3 van de 20 storingen weg gefilterd; voor Overschie werden 64 van de 110 storingen weg gefilterd; en voor Westwijk Vlaardingen werden 24 van de 65 storingen weg gefilterd. In Tabel 2 staat het aantal kilometers leiding per materiaal en het bijbehorende aantal storingen samengevat.

Tabel 2. Gebiedsdata voor de case studies. De storingsdata zijn gefilterd zoals beschreven in de tekst.

Gebied	km AC	# storingen AC	km PVC	# storingen PVC
Westwijk Vlaardingen	10,5	16	18,2	25
Overschie	0,5	0	64,8	46
Brabant 'alle leidingen'	11,2	14	8,4	3
Brabant 'uitgenomen'	4,2	10	0,4	2

3.2.2 Invoerdata

De leidingen in de case study-gebieden zijn ten behoeve van de comsima berekeningen opgedeeld in segmenten met een lengte van ~7 m. Vervolgens is voor ieder segment de benodigde invoerdata zo goed mogelijk verzameld. Veel van de data werd eerder al door Spatial Insight verzameld in het kader van de Comsima pilots bij Brabant Water en Evides (zie ook Paragraaf 2.2.2). Op hoofdlijnen geldt voor de reeds beschikbare data:

- de leidingspecificaties (diameter, wanddikte, materiaal, aanlegjaar) volgen uit het leidinginformatiesysteem van het drinkwaterbedrijf;

- de gemiddelde waterdruk in de leiding volgt uit het hydraulische netwerkmodel (met een criterium dagpatroon) van het drinkwaterbedrijf;
- de parameters met betrekking tot verkeersbelasting (afstand tot de weg, verkeersklasse) volgen uit de Top10NL wegenkaarten;
- de parameters met betrekking tot de bodem (bodemsotype) volgen uit de Alterra bodemkaarten;
- de parameters met betrekking tot verschildzettingen (hoogte van de verschildzetting, horizontale afstand waarover de verschildzetting zich voltrek) volgen uit SAR satelietdata van het bedrijf SkyGeo.

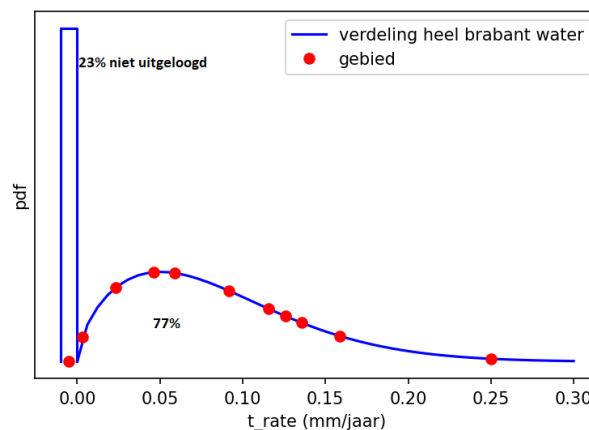
Voor de resterende benodigde invoerdata is dus geen (GIS) databron met specifieke informatie per leidingdeel beschikbaar. Daarnaast zijn voor de bovenstaande data nog geen onzekerheden gedefinieerd. Deze hiaten zijn – waar mogelijk – als volgt opgevuld:

- de diepteligging van de leiding wordt aangenomen op 1 m, met een variatiecoëfficiënt van 0.1 als onzekerheid (dat wil zeggen: het wordt aangenomen dat de diepteligging normaal verdeeld is met een gemiddelde van 1 m en een standaardafwijking van 10% van het gemiddelde);
- de onzekerheid in de waterdruk wordt normaal verdeeld verondersteld met een variatiecoëfficiënt van 0.1 (de standaardafwijking is 10% van de gemiddelde waarde die op basis van het hydraulische model aan een leidingdeel is toegekend).
- De verschillende relevante bodemeigenschappen (zoals dichtheid en veerconstante) worden afgeleid uit het bodemtype via de kennisregels in Comsima. Voor ieder van de parameters wordt een normale verdeling met een variatiecoëfficiënt van 0.1 aangenomen.
- De wanddikteafname van AC leidingen (uitlogging) kan lastig worden gebaseerd op de kennisregels binnen Comsima omdat historische waterkwaliteitsgegevens slechts beperkt beschikbaar zijn. De wanddikteafname wordt daarom gebaseerd op een verzameling exitbeoordelingen die Brabant Water heeft uitgevoerd voor het hele voorzieningsgebied van Brabant Water. De verdeling van uitlogingssnelheden in die dataset is afgebeeld in Figuur 3. Deze verdeling is in de Monte Carlo-module van Comsima toegepast als de verdeling van mogelijke waarden voor de uitlogging per segment. Zodra leidingen in de simulatie echter 'het jaar 1990' bereiken, wordt deze verdeling in de simulatie aangepast zodat alleen nog maar externe uitlogging wordt meegenomen. Dit wordt gedaan omdat Brabant Water vanaf 1990 op het betreffende pompstation (Nuland) overging tot het conditioneren van een positieve calciëverzadigingsindex (SI) om inwendige uitlogging in het drinkwater tegen te gaan.
- Omdat Evides geen gebieds-specifieke data op het vlak van AC beschikbaar heeft, worden voor Westwijk Vlaardingen en Overschie dezelfde verdelingen voor uitlogging aangenomen als voor Brabant Water.
- De wanddikten van de AC en PVC leidingen zoals die in het LIS staan, zijn cataloguswaarden. Het is bekend dat de cataloguswaarden slechts een ondergrens voor de wanddikte geven. Op basis van de exitbeoordelingen van Brabant Water is de spreiding in werkelijke wanddikten van AC bepaald. De wanddikten bleken normaal verdeeld met een variatiecoëfficiënt van 0.12. De onzekerheid in wanddikte is in Comsima vervolgens als volgt gedefinieerd: de waarde uit het LIS wordt als de 2σ ondergrens aangenomen, zodat met behulp van de LIS waarde en de gevonden variatiecoëfficiënt de spreiding in wanddikten kan worden gevonden. In Figuur 4 is dit geïllustreerd. Voor PVC is dezelfde aanpak gebruikt, op basis van de exitbeoordelingen uit (Mesman en van Laarhoven, 2018) waarvoor eerder werd gerapporteerd dat de wanddikten normaal verdeeld zijn met een variatiecoëfficiënt van 0.03 (van Laarhoven 2020).
- De tijdsafhankelijke toelaatbare spanning voor PVC wordt beschreven door twee parameters: een initiële waarde en de snelheid waarmee deze afneemt als functie van de tijd (specifiek voor Comsima is dit beschreven in Wols en Moerman, 2018). Beide waarden worden hier gebaseerd op twee sets van exitbeoordelingen: een serie barstdrukproeven die is uitgevoerd tijdens het grote PVC onderzoek van TNO (Boersma en Breen, 2005) en een serie driepuntbuigproeven die de drinkwaterbedrijven (via KWR) bij TNO hebben laten uitvoeren (Mesman en van Laarhoven, 2018). De verdelingen die volgen uit beide meetseries zijn afgebeeld in Figuur 5. Omdat er

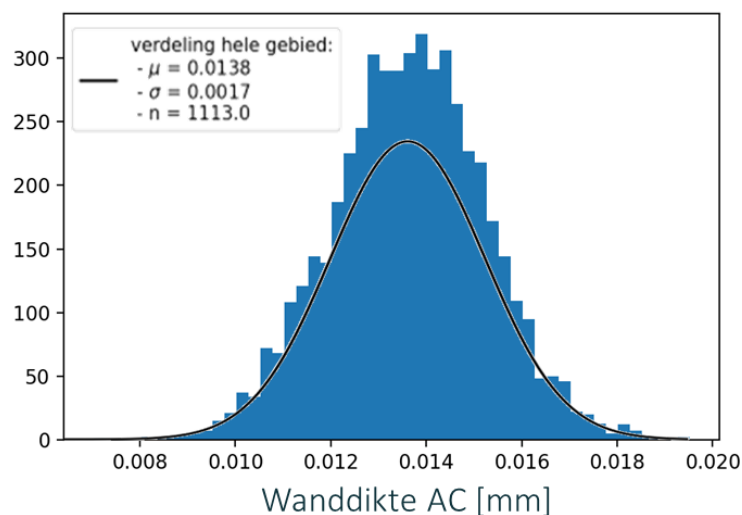
een substantieel verschil is tussen de uitkomsten van de twee meetseries worden de berekeningen herhaald met waarden op basis van beide sets.

- Er wordt aangenomen dat er geen grote onzekerheid is in de parameters met betrekking tot verkeersbelasting (afstand tot de weg, verkeersklasse) en de parameters met betrekking tot verschilzettingen (hoogte van de verschilzetting, horizontale afstand waarover de verschilzetting zich voltrek) omdat deze parameter waarden op basis van directe databronnen aan ieder leidingdeel is toegekend (voor ieder segment is via GIS de afstand tot de weg op basis van de wegenkaart bepaald). Dit is een vereenvoudiging; idealiter zou de nauwkeurigheid van de databronnen als onzekerheid kunnen worden opgegeven, als hier meer over bekend zou zijn.

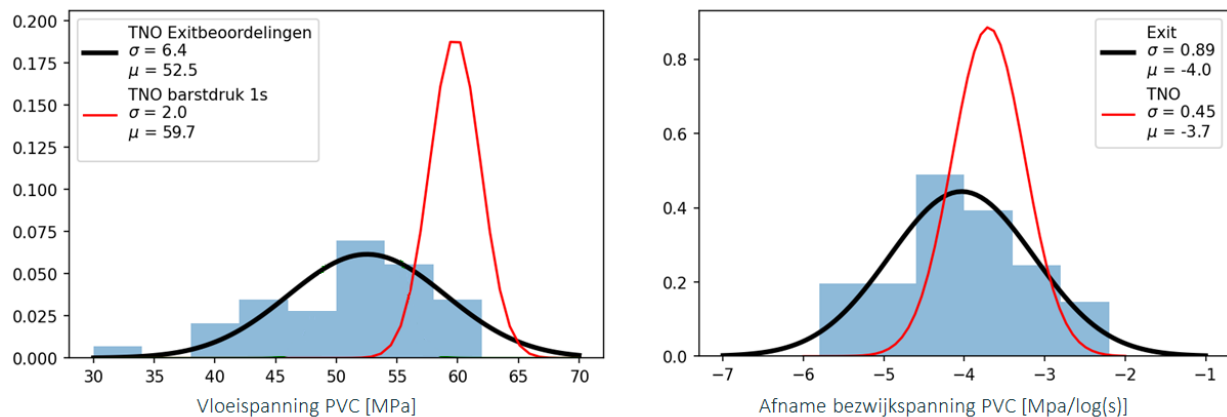
De beschikbaarheid van de invoerdata, inclusief onzekerheid, is samengevat in Tabel 3.



Figuur 3. Verdeling van totale uitlogingssnelheden in het voorzieningsgebied van Brabant Water, gemeten met exit beoordelingen. De verdeling (blauwe lijn) is gebaseerd op meetdata en wordt beschreven als een Weibull functie met vormparameter 1,59 en schaalparameter 0,094, uitgebreid met een piek op 0 die 23% van het oppervlak van de verdeling in beslag neemt. De rode punten geven uitlogingssnelheden aan die zijn gevonden met 11 exitbeoordelingen die zijn uitgevoerd binnen het gebied van de case study.



Figuur 4. De zwarte lijn geeft de verdeling van AC wanddikten die is bepaald uit de set van exitbeoordelingen van Brabant Water (variatiecoëfficiënt $c = 0.12$). Het blauwe histogram geeft de verdeling van wanddikten die wordt verkregen in Comsima wanneer de onzekerheid in wanddikte voor ieder leidingdeel wordt aangenomen als een normaalverdeling met een gemiddelde μ gelijk aan de LIS waarde gedeeld door $(1 - 2 \times c)$ en met standaardafwijking σ gelijk aan $c \times \mu$.



Figuur 5. De verdeling voor de initiële vloeispanning van PVC (links) en de snelheid waarmee deze afneemt in de tijd (rechts), gebaseerd op een serie van barstdrukproeven (rood) en een serie van driepuntbuigproeven (zwart, meetdata als blauwe balken).

Tabel 3. De beschikbaarheid van data voor de case studies. Rode velden geven aan dat het gaat om een ruwe aanname die moest worden gedaan vanwege een gebrek aan beschikbare data.

		Waarde	Onzekerheid
Diameter		LIS	nvt
Wanddikte		LIS	exitbeoordelingen PVC, AC
Druk		hydraulisch model	aanname: normaal met coefficient 0.1
Grondsoort		grondsoortenkaart	nvt
	Grondeigenschappen	Kennisregels Comsima	aanname: normaal met coefficient 0.1
Verkeer	afstand	Top10NL	nvt
	klasse	Top10NL	nvt
Jaar van aanleg		LIS	nvt
Diepteligging		aanname: 1m	aanname: normaal met coefficient 0.1
Afname wanddikte AC		exitbeoordelingen AC	exitbeoordelingen AC
Afname toelaatbare spanning PVC		exitbeoordelingen PVC	exitbeoordelingen PVC
Zettingsverschil		Sateliëtdata	nvt

3.2.3 Berekeningen

Voor ieder van de vier pilot gebieden zijn 3 totaalberekeningen uitgevoerd: een voor het AC in het gebied; een voor het PVC in het gebied met de sterkte-eigenschappen op basis van de barstdrukproefdata; een voor het PVC in het gebied met sterkte-eigenschappen op basis van de driepuntbuigproefdata. Voor iedere totaalberekening van een gebied werd eerst, per leidingsegment, een Comsima berekening voor 300 jaar met 5000 Monte Carlo-herhalingen uitgevoerd. Op basis van die berekeningen kon de levensduurverdeling per leidingsegment worden bepaald. Vervolgens werden voor iedere totaalberekening de storings in het systeem van leidingsegmenten gesimuleerd met 100 herhalingen, op basis waarvan het te verwachten storingsgedrag van het systeem kon worden bepaald zoals beschreven in Paragraaf 2.4.

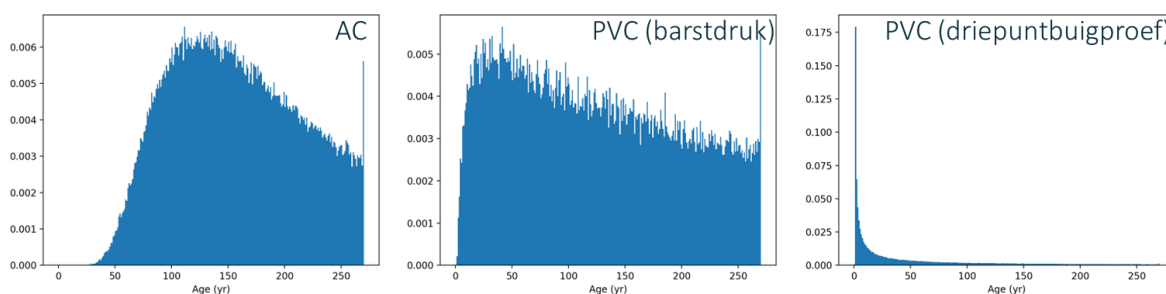
Tijdens het simuleren van het repareerbare systeem worden AC segmenten gerepareerd door ze te vervangen met PVC segmenten (met de bijbehorende, vooraf uitgerekende, aangepaste levensduurverdeling).

3.3 Resultaten

3.3.1 Levensduurverdelingen per segment

In Figuur 6 zijn voor het gebied Westwijk Vlaardingen voorbeelden gegeven van levensduurverdelingen die zijn berekend voor: een AC segment, een PVC segment met sterkte-eigenschappen volgens de barstdrukproeven, een PVC segment met sterkte-eigenschappen volgens de driepuntbuigproeven. Voor de andere gebieden worden

vergelijkbare levensduurverdelingen per segment gevonden. Het valt op dat de sterkte-eigenschappen van PVC op basis van driepuntbuigproeven leiden tot onrealistisch korte levensduren (nagenoeg ieder segment van 7 meter zou storen binnen 50 jaar). Om deze reden is er in de opvolgende berekeningen voor gekozen om alleen nog te werken met de data op basis van barstdrukproeven. Volgens de gevonden levensduurverdelingen zal een substantieel deel van de segmenten (~40% van het AC en ~20% van het PVC) een levensduur bereiken voorbij de grenzen van de modelberekening (300 jaar).



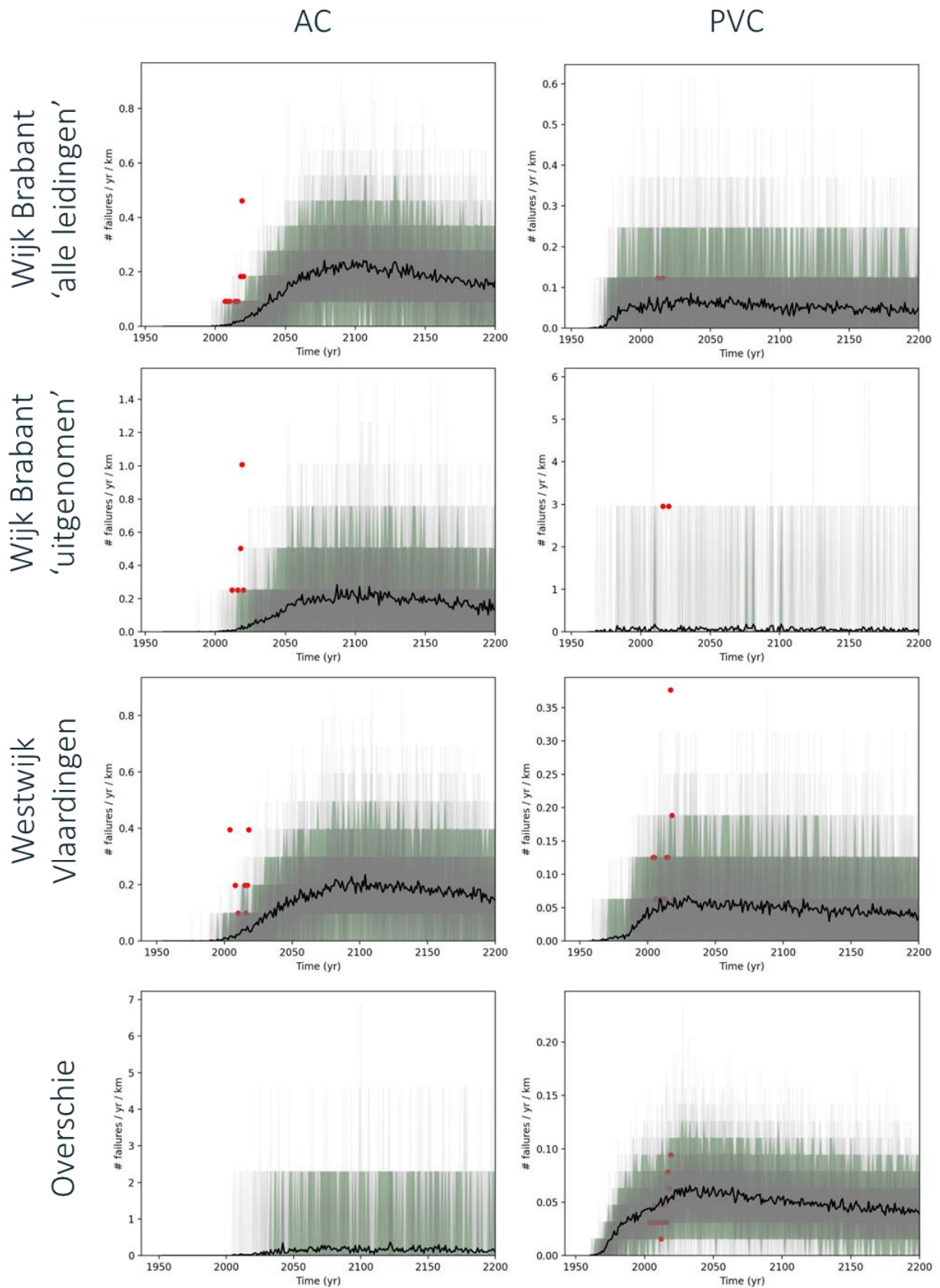
Figuur 6. Voorbeelden van de levensduurverdelingen die voor ieder segment in het systeem worden berekend met Comsima.

3.3.2 Storingsfrequenties per gebied

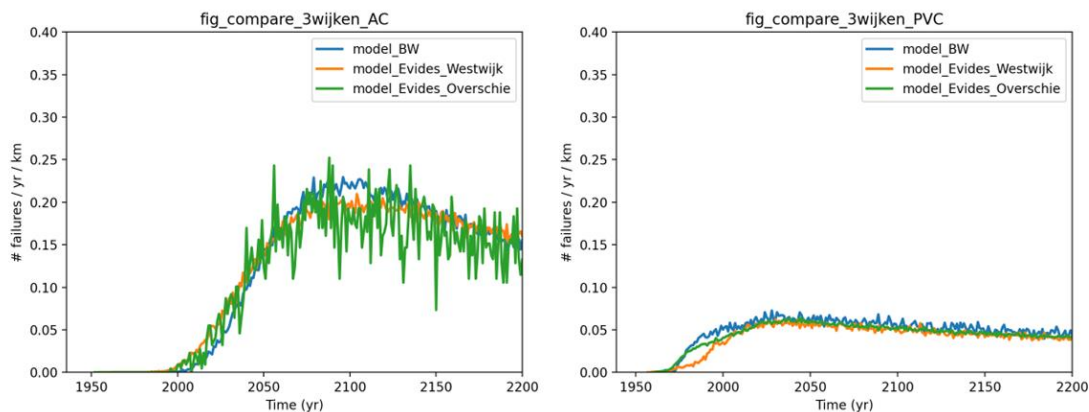
In Figuur 7 zijn de berekende leeftijdsafhankelijke storingsfrequenties van de verschillende gebieden weergegeven. De berekende gemiddelde storingsfrequentie als functie van de tijd is weergegeven met de zwarte lijn. De individuele curves van alle Monte Carlo-herhalingen zijn weergegeven in het grijs ter indicatie van de spreiding rond het gemiddelde waar – op basis van de onzekerheden in de data – volgens het model redelijkerwijs rekening mee moet worden gehouden. Het valt op dat deze spreiding groot is, tenminste zo groot als het gemiddelde zelf, zodat het niet vreemd is dat er in sommige jaren 0 storingen optreden. Voor Overschie AC en Brabant ‘uitgenomen’ is de spreiding extreem groot ten opzichte van het gemiddelde, omdat het hier systemen met een totale lengte van minder dan een halve kilometer betreft, waardoor een enkele storing direct opvalt.

De historische storingsdata die voor de gebieden is aangeleverd is ook ingetekend in Figuur 7, in de vorm van de jaarlijks geregistreerde storingsfrequenties (rode punten). De meeste meetpunten vallen binnen de spreiding die volgens het model verwacht moet worden, met enkele uitschieters bóven de voorspelling voor het AC in Brabant ‘alle leidingen’ en ‘uitgenomen’, en voor AC en PVC in Westwijk Vlaardingen. De vergelijking suggereert dat de berekende gemiddelde storingsfrequenties conservatief zijn ten opzichte van de metingen, maar dat de spreiding in de modeluitkomsten goed in staat is om de spreiding in de metingen van jaar tot jaar te beschrijven.

In Figuur 8 zijn de berekende gemiddelde storingsfrequenties van Westwijk Vlaardingen, Overschie en Brabant Water ‘alle leidingen’ over elkaar heen getekend voor AC en PVC. Het valt op dat het berekende storingsgedrag voor deze wijken maar minimaal verschilt. Dit is te verklaren door het feit dat veel van de invoerdata voor de drie gebieden gelijk, omdat bijvoorbeeld dezelfde aannamen over wanddikten, diepteligging, degradatiesnelheden en sterkte- eigenschappen gemaakt moesten worden bij gebrek aan gebieds-specifieke data. De grootste verschillen die aanwezig zijn in de data zitten waarschijnlijk in de verschilzettingen per segment en mogelijk in de verkeersbelastingen, maar geen van beiden lijkt tot grote verschillen in storingsgedrag op gebiedsniveau te leiden.



Figuur 7. Leeftijdsafhankelijke storingsfrequenties van de AC en PVC leidingen in de vier case study gebieden. De zwarte lijn geeft de gemiddelde storingsfrequentie; de grijze lijnen geven de curves van de individuele Monte Carlo-herhalingen als een indicatie van de spreiding die rond het gemiddelde verwacht mag worden. De rode punten geven de storingsfrequenties in de jaren dat voor deze gebieden storingen werden geregistreerd.



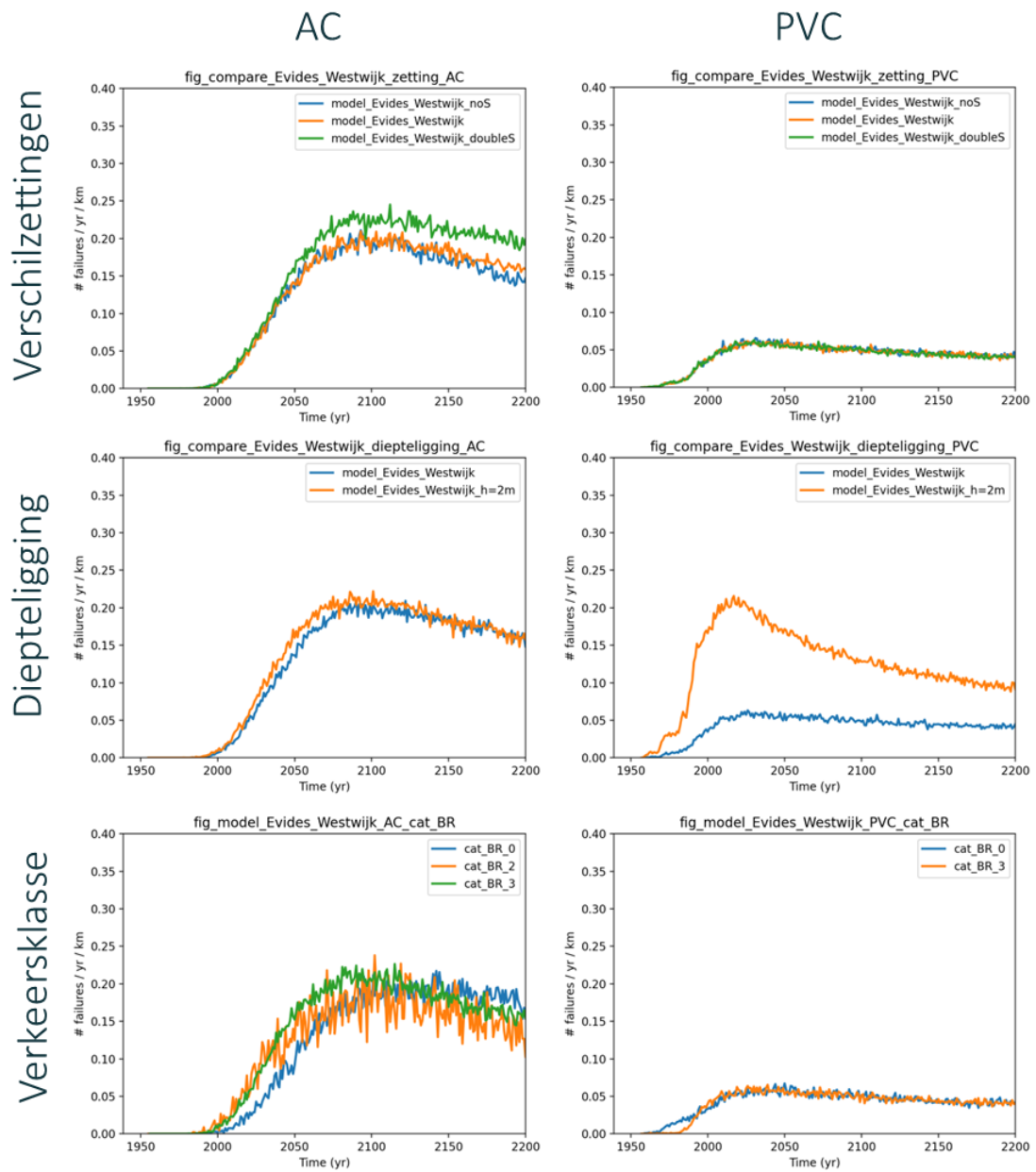
Figuur 8. Vergelijking van de gemiddelde storingsfrequenties als functie van leeftijd van drie van de case study gebieden.

3.3.3 Gevoeligheden in het model

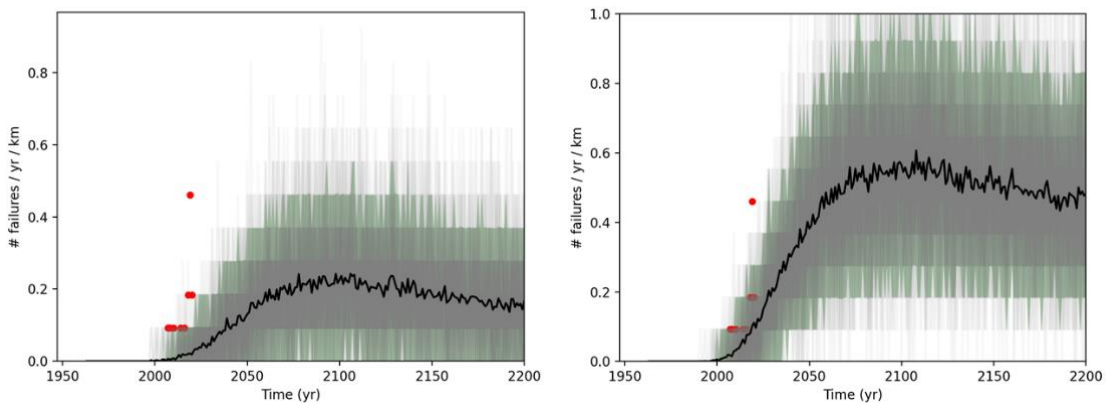
Figuur 8 laat zien dat een gebrek aan gebiedspecifieke informatie het moeilijk maakt om gebiedspecifiek storingsgedrag te modelleren. Er is daarom onderzocht voor welke informatie het model het gevoeligst is, zodat duidelijk wordt welke gebiedspecifieke informatie verzameld moet worden als men wil inzetten op storingsvoorspelling voor individuele leidingen. Uit Figuur 5 en Figuur 6 bleek al dat er voor PVC een grote gevoeligheid is voor de informatie over de sterkte-eigenschappen. Daarnaast is in het verleden voor AC al aangetoond dat het model erg gevoelig is voor de originele wanddikte van de buis en de degradatiesnelheid van de wand (van Laarhoven en van Vossen, 2019).

Hier zijn een aantal extra totaalberekeningen (volgens de aanpak uit Paragraaf 3.2.3) uitgevoerd om de gevoeligheid voor verkeersbelasting, verschildzettingen en diepteligging te onderzoeken. De uitkomsten van de berekeningen zijn samengevat in Figuur 9. Voor AC blijkt een kleine gevoeligheid voor verschildzettingen en verkeersbelasting aanwezig, en er lijkt geen noemenswaardige gevoeligheid voor diepteligging te zijn. Voor PVC blijkt een zeer grote gevoeligheid voor diepteligging te zijn, en geen noemenswaardige gevoeligheid voor verschildzettingen of verkeersbelasting. De lagere gevoeligheid van PVC voor verkeersbelasting kan verklaard worden door de visco-elastischeiteit van dit materiaal, die er effectief voor zorgt dat het materiaal een hoge sterkte heeft wanneer het gaat om het weerstaan van kortstondige belasting zoals verkeersbelasting (zie ook Wols et al.; 2015); daarnaast zijn eventuele effecten van de cyclische aard van verkeersbelasting (bijvoorbeeld vermoeiing van het materiaal) niet opgenomen in het model). De lagere gevoeligheid voor zettingen van PVC kan verklaard worden door de grotere flexibiliteit van het materiaal: PVC kan makkelijker meebewegen met de vervormingen die opgelegd worden door de bodem. Daarbij moet worden opgemerkt dat verschildzettingen er ook geregeld toe leiden dat leidingen in contact komen met andere ondergrondse infrastructuur, en geregeld leiden tot het uitschuiven van verbindingen. Die verschijnselen worden niet gemodelleerd in Comsima, zodat het belang van zettingen voor het storingsgedrag hier in feite wordt onderschat.

Tenslotte is de gevoeligheid van het model rond de aannames over het conditioneren van het drinkwater om uitloging tegen te gaan. Zoals beschreven in Paragraaf 3.2.2 wordt inwendige uitloging in de Comsima berekeningen stopgezet vanaf 1990. Brabant Water conditioneert het water waarmee de case study wijk wordt voorzien (productielocatie Nuland) sinds 1990 met een overwegend positieve SI (0.2 ± 0.3). Op het moment van schrijven wordt in de stand van de praktijk aangenomen dat dit de leidingen beschermt tegen inwendige uitloging. Om te zien hoe het storingsgedrag door die aannames wordt beïnvloed, is er ook een berekening uitgevoerd met segmenten waarbij deze correctie niet wordt uitgevoerd. De uitkomsten van de berekeningen met en zonder correctie staan afgebeeld in Figuur 10. Het resultaat van de niet gecorrigeerde berekening ligt dicht bij de storingsdata. Het verschil in uitkomsten demonstreert bovendien opnieuw de gevoeligheid van de conditie en het storingsgedrag van leidingen voor de uitlogingsnelheid en dus ook de gevoeligheid van het model voor aannames hierover.



Figuur 9. Gevoeligheidsanalyse voor het gebied Westwijk Vlaardingen. De originele berekening is een aantal keer herhaald, steeds met variatie in één parameter: de verschilzetting van alle segmenten in het systeem op 0, de originele waarde, of het dubbele van de originele waarde gezet; de diepteligging op 1 m of op 2 m gezet; de verkeersklasse van alle segmenten in het systeem op 0, 2, of 3 gezet.



Figuur 10. (a) De uitkomsten van de originele berekening voor het gebied van Brabant Water 'alle leidingen' en (b) de uitkomsten van de berekening zonder correctie van de uitlogingsnelheden in verband met de conditioning van de SI tijdens productie sinds 1990.

3.4 Discussie

Met betrekking tot de vragen uit de inleiding kan het volgende worden gesteld:

- De databeschikbaarheid blijft een uitdaging. Zoals in Tabel 3 samengevat is het niet mogelijk om voor alle invoerparameters een inschatting van waarde en spreiding te maken op basis van directe data. In verband met de gevoeligheden van het model zijn wanddikte (voor AC en PVC), diepteligging (vooral voor PVC), druk, weerstand tegen scheurgroei (PVC) en uitlogingssnelheid (AC) het belangrijkste om zoveel mogelijk op zo klein mogelijke lengteschaal in kaart te hebben (voor de uitlogingssnelheden geldt dat de dataset van exitbeoordelingen van Brabant Water al zeer geschikt is voor het inschatten van de algemene onzekerheid, maar structureel verschillen tussen leidingen of segmenten aanwijzen is daarmee nog niet binnen bereik. Voor de weerstand tegen langzame scheurgroei van PVC geldt dat deze niet snel op segment niveau meetbaar zal zijn, maar op dit moment is er ook nog niet voldoende data voor een eerste inschatting op bijvoorbeeld cohortniveau). Pas in tweede instantie zal het interessant worden om nauwkeurigere inschattingen van de onzekerheid in verschilzettingen, verkeersafstand en bodemsoort/bodemeigenschappen na te jagen.
- De overeenkomsten tussen model en storingsdata zijn redelijk. Het model lijkt wat conservatief ten opzichte van de metingen, maar de orde van grootte sluit goed aan. Het model laat via de spreiding in de individuele iteraties (grijze banden Figuur 7) bovendien een goede overeenkomst zien met de spreiding in gemeten storingsfrequenties van jaar tot jaar.
- De primaire vorm van de uitkomsten (de gemiddelde storingsfrequentie van het systeem als functie van de leeftijd) sluit goed aan bij de huidige processen van de drinkwaterbedrijven. De huidige beslissingsondersteuningssystemen maken typisch gebruik van curves met een vergelijkbare betekenis, zodat de uitkomsten bijna 'plug and play' gebruikt zouden kunnen worden. Daarnaast zouden de Comsima berekeningen in de toekomst een nieuwe methode om leidingen te beoordelen kunnen opleveren: met Comsima kan nu een inschatting gemaakt worden van het cumulatief aantal (spontane) storingen dat redelijkerwijs verwacht mag worden (gemiddelde en bandbreedte). Voor leidingen die aangelegd zijn sinds het begin van de storingsregistratie, kan een drinkwaterbedrijf ook het werkelijke cumulatieve aantal storingen bijhouden, om op termijn te beoordelen of een leiding bovenmatig veel stoort (zo veel dat het niet meer aannemelijk is dat het hier om een statistische toevalligheid gaat).

De case studies die in dit hoofdstuk zijn uitgewerkt betreffen weliswaar kleine deelgebieden van het leidingnet, maar betreffen geen van allen daadwerkelijk één enkele leiding. De case studies Overschie AC en Brabant 'uitgenomen' PVC komen het dichtst in de buurt, met ieder een leidinglengte van ongeveer een halve kilometer. De spreiding in de uitkomsten voor die gebieden zijn groot vanwege de beperkte leidinglengte in combinatie met de grote onzekerheden in de invoerdata. Gezien de beperkte mogelijkheid om leiding/segment-specifieke data te verzamelen met slechts een beperkte onnauwkeurigheid, is het op dit moment waarschijnlijk alleen nuttig om in te zetten op case studies met nog kortere systemen wanneer daar ook een substantiële extra inspanning om invoerdata te verzamelen aan gekoppeld kan worden, in combinatie met langjarige storingsdata.

4 Conclusies, bedrijfsparagraaf en aanbevelingen

4.1 Conclusie

In dit onderzoek is een methode uitgewerkt en geïmplementeerd in Comsima waarmee de tijdsafhankelijke storingsfrequentie van kleine leidingsystemen op zuivere wijze kan worden gesimuleerd. Toepassing van de methode op enkele pilot-gebieden laat zien dat de modeluitkomsten redelijk overeenkomen met gemeten storingsdata. De beperkte beschikbaarheid van de benodigde invoerdata leidt echter tot grote onzekerheden in de modeluitkomsten en tot een beperking van de mogelijkheid om verschillen tussen leidingen via het model bloot te leggen. Databeschikbaarheid zal daarmee in de nabije toekomst het absolute knelpunt zijn voor conditiebepaling en -voorspelling op basis van modellen voor alle individuele leidingen in een gebied.

4.2 Bedrijfsparagraaf

Drinkwaterbedrijven willen zoveel mogelijk storingen voorkomen of in control zijn over het aantal storingen per jaar. Met de huidige cohorten leidingen kunnen storingscurves worden opgesteld. Echter bevatten deze cohorten grote lengtes leidingen waardoor de curves een gemiddelde geven voor het cohort. De curve onderschat daarmee de storingsfrequentie voor bepaalde leidingen en overschat het weer voor andere. De drinkwaterbedrijven vervangen daardoor mogelijk een aantal leidingen te vroeg, dan wel te laat. Het verkleinen van het aantal leidingen per cohort tot zelfs één leidingdeel en daarvoor een storingscurve te bepalen, kan hiervoor een oplossing zijn. Uit de resultaten van dit onderzoek wordt duidelijk dat dit veel detailinformatie vraagt van de leiding en zijn omgeving. De detailinformatie zou per leidingdeel verzameld moeten worden wat met de huidige beschikbare mogelijkheden kostbaar is. Mogelijk dat eerst het verkleinen van het aantal leidingen per cohort aan de hand van (meer) parameters en dus het aantal cohorten uit te breiden, een kosteneffectieve tussenoplossing kan zijn. [Roel Diemel, Brabant water; Bart Jacobs Vitens; Patrick van den Ende, Evides; Filip Vancoillie, De Watergroep]

4.3 Aanbevelingen

Het modeleren van conditie kan handvatten bieden om de conditie van het leidingnet in te schatten op een manier die met alleen storingsregistratie niet haalbaar is. Mogelijke voordelen zijn onder andere: het specifieker maken van inschattingen; het extrapoleren van toekomstig gedrag; en het onderzoeken van gedrag in denkbeeldige scenario's. Inmiddels is echter ook duidelijk dat databeschikbaarheid op dit moment een groot, duur en onvermijdelijk knelpunt is. Als de sector een stap verder wil komen met conditiemodellen, dan kunnen we er niet omheen om meer data over het leidingnet te verzamelen en te bewaren. Vanuit de KSLB/Comsima onderzoekslijn tot nu toe wordt daarin de volgende prioritering aanbevolen:

- 1 diepteligging en wanddikte van de leidingen;
- 2 uitlogingssnelheid (AC) en Weerstand tegen Langzame Scheurgroei (PVC);
- 3 druk, verschilzettingen, bodem/beddingseigenschappen.
- 4 (incidentele belastingen; niet aan bod gekomen in dit onderzoek)

Een programma/proces binnen de bedrijfsvoering om dergelijke informatie structureel te verzamelen is aan te bevelen. Eén natuurlijk moment hiervoor is aanleg; alle momenten waarop de grond opengaat kunnen ook natuurlijke momenten zijn. Als er alleen maar data over storende leidingen verzameld wordt, kan het op den duur nodig zijn om gericht gezonde leidingen te onderzoeken (dan wel destructief dan wel met andere typen inspecties)

om geen vertekend beeld te krijgen over de conditie van het net. Deze opgave is niet aan te bevelen als iets ‘voor de monteur voor erbij’; datavergaring is een grote opgave die waarschijnlijk eigen aandacht en training vereist.

Nu Comsim is aangepast om ook voorspellingen voor kleine leidingsystemen te maken, zou dergelijke meer gedetailleerde data eerst op-pilot schaal kunnen worden verzameld. Op die manier kan op voorhand meer gevoel gekregen worden voor de werkelijke meerwaarde die adequate data in combinatie met modellen kunnen hebben.

Merk op dat de meerwaarde van bepaalde leidinginspecties ook zal afhangen van deze opgave om meer data te verzamelen. De conditie van een leiding is een samenhang van factoren. Wanneer één leidingaspect wordt geïnspecteerd (bijv. restwanddikte), is een model van alle factoren in samenhang nodig om de betekenis van die inspectie op waarde te kunnen schatten.

Een alternatieve (meer directe) aanpak voor het inschatten van leidingconditie is storingsregistratie. Ook daar geldt echter dat het verzamelen van meer gedetailleerde informatie over leiding en omgeving essentieel zal zijn wanneer drinkwaterbedrijven een stap verder willen komen met het aanscherpen van de cohorten voor storingsanalyse. Alleen wanneer dergelijke informatie voor het hele leidingnet beschikbaar is, kunnen storingen in groepen verder worden gesplitst om meer invloedsfactoren bloot te leggen.

In dit project kwam zijdelings naar voren dat sommige drinkwaterbedrijven geen informatie bewaren over het verleden van hun leidingnet: het LIS wordt actueel gehouden met mutaties, maar de geschiedenis van mutaties is niet beschikbaar. Het is aan te raden om die informatie wél te bewaren. Wanneer drinkwaterbedrijven hun storingsregistratie willen benutten om van het verleden te leren, is de beschikbaarheid van deze informatie een essentiële voorwaarde.

5 Referenties

Beuken, R. H. S. en A. Moerman (2017) Uniforme storingsregistratie (USTORE). Praktijkcode voor het beheer van storingsregistratie van leidingnetten. PCD 9:2017, KWR, Nieuwegein.

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

Drevijn, A. (2020) Impact SAR data op Comsima berekening Brabant Water. Rapportage 2019024_1, Spatial Insight, Haarlem.

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

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

NIST (2012) NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, DOI: <https://doi.org/10.18434/M32189>, pagina: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr171.htm>, laatst geraadpleegd: mei 2022.

van den Ende, P (2020) Resultaten Comsimaberekening leidingnet Evides. Notitie aan de stuurgroep FACTS, projectnummer PR005151-0004, Evides waterbedrijf, Rotterdam.

van Laarhoven, K.A. en van Vossen (2019) Beoordeling van methodieken voor het voorspellen van toekomstige storingsfrequenties. BTO 2019.050, KWR, Nieuwegein.

van Laarhoven, K.A. (2020) Een model voor scheurgroei in PVCU buizen, geïmplementeerd in Comsima. BTO 2020.001, KWR, Nieuwegein.

van Vossen, J. en van Laarhoven, K.A. (2017) Voorspellen storingsfrequenties: haalbaarheid en methodiek. BTO 2017.045, KWR, Nieuwegein

Wang, Y., J. Shi and C. W. W. Ng (2011). "Numerical modeling of tunneling effect on buried pipelines." *Canadian Geotechnical Journal* 48(7): 1125-1137.

Wols, B. A., Moerman A. en Vertommen, I. (2015). COMSIMA: model voor spanningen op ondergrondse leidingen. BTO 2015.082, KWR, Nieuwegein.

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

I Benodigde invoergegevens voor Comsima

Tabel 4. Invoerparameters die nodig zijn om een leidingdeel door te rekenen met Comsima. In sommige gevallen kan de waarde van een parameter met behulp van geïntegreerde kennisregels worden ingeschat op basis van alternatieve parameters. Parameters die alleen nodig zijn voor een kennisregel (en dus achterwege kunnen worden gelaten als de kennisregel niet nodig is) zijn gemarkeerd met een *. De parameters worden in meer detail toegelicht in (Wols et al., 2015; Wols en Moerman, 2017).

Invoerparameter	Symbool	Inschatting van parameterwaarde met behulp van kennisregels is mogelijk op basis van deze parameters:
Leiding: diameter	D	
Leiding: lengte leidingdeel	L	
Leiding: lengte buisdelen	x	
Leiding: wanddikte	t	D
Leiding: diepteligging	H	
Leiding: type materiaal	mat	
Leidingmateriaal: elasticiteitsmodulus	E	mat
Leidingmateriaal: vloeispanning	σ_y	mat
Leidingmateriaal: dichtheid	ρ_{mat}	mat
Bedrijfsvoering: waterdruk	P	
Bodem: bodemtype	bod	
Bodem: dichtheid droog	ρ_{dry}	bod
Bodem: dichtheid nat	ρ_{wet}	bod
Bodem: veerconstante	K	Bod
Bodem: maximale verschilzetting	S_{max}	
Bodem: scherpte verschilzetting	ix	
Bodem: grondwaterstand	Hw	
Ligging: afstand tot de weg	R	
Ligging: verkeersklasse	$Traf$	
Extra parameters voor de verouderingsmodule		
Veroudering AC: uitlogingssnelheid	t_rate	$Coat, SI, aggr, Hw$
*Veroudering AC: leiding coating	$coat$	
*Veroudering AC: SI drinkwater	SI	
*Veroudering AC: agressiviteit bodem	$aggr$	bod
Levensduur PVC: weerstand scheurgroei	WLS	mat
Snelheid van verschilzettingen	S_{max_rate}	