

BTO 2019.050 | Oktober 2019

BTO rapport

Beoordeling van methodieken voor het
voorspellen van toekomstige
storingsfrequenties: resultaten van een
pilot met AC

BTO

Beoordeling van methodieken voor het voorspellen van toekomstige storingsfrequenties : resultaten van een pilot met AC

BTO 2019.050 | Oktober 2019

Opdrachtnummer

402045-006

Projectmanager

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

Opdrachtgever

BTO - Thematisch onderzoek - Distributie

Auteur(s)

dr. ir. K.A. (Karel) van Laarhoven, dr. J. (Jozanneke) van Vossen en B. (Bram) Hillebrand, MSc met medewerking van Roel Diemel (Brabant Water), Derk Rouwhorst (WMD) en Masja Bronts (WLN)

Kwaliteitsborger(s)

dr. P. (Peter) van Thienen

Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.

Een jaar na publicatie is het openbaar.

Keywords

USTORE, Comsima, storingsanalyse, conditie, asbestcement

Jaar van publicatie
2019

Meer informatie
dr. ir. K.A. (Karel) van Laarhoven
T 030-6069697
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

Oktober 2019 ©

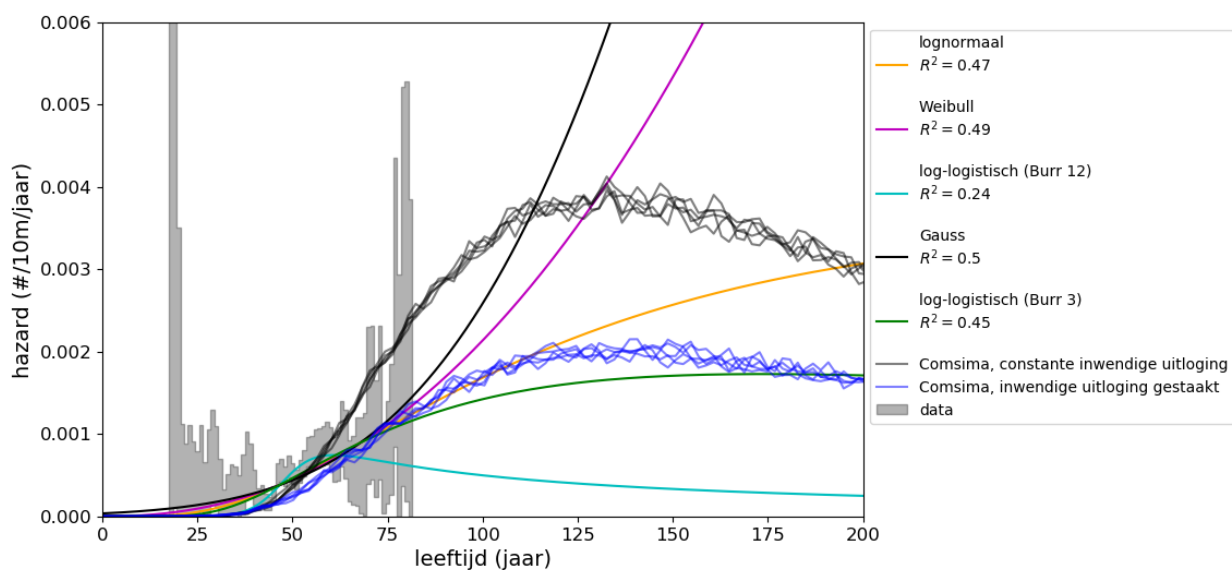
Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vervoelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevens bestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming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

BTO Managementsamenvatting

Comsima kan met kwalitatief goede invoer het storingsgedrag van asbestcementleidingen goed voorspellen

Auteur(s) Dr. ir. K.A. (Karel) van Laarhoven, dr. J. (Jojanneke) van Vossen en B. (Bram) Hillebrand, MSc

Voor tactische en strategische beslissingen omtrent het vernieuwen van het drinkwaterdistributienetwerk kunnen drinkwaterbedrijven gebruikmaken van voorspellingen van leidingconditie op basis van historische storingsgegevens door een geschikt model te kiezen om de historische data te beschrijven en eventueel te extrapoleren. De keuze van dit model is ondersteund met het leidingnetconditiemodel Comsima en daarmee gebaseerd op kennis van de fysische processen achter leidingdegradatie. Deze aanpak lijkt veelbelovend, maar vraagt veel van drinkwaterbedrijven met betrekking tot het verzamelen van praktijkdata.



Vijf kansverdelingen die veel gebruikt worden om storingsgedrag te beschrijven en te extrapoleren, gefit op storingsdata van Brabant Water. Ook zijn twee voorspellingen van het storingsgedrag met het fysische model Comsima weergegeven ter vergelijking. Op die manier kan een keuze voor een bepaalde verdeling ondersteund worden met de fysische kennis achter Comsima.

Belang: onderbouwde storingsvoorspellingen voor tactische en strategische beslissingen

Voor tactische beslissingen op de korte termijn – bijvoorbeeld over de prioritering van het vernieuwen van leidingen – kunnen drinkwaterbedrijven varen op voorspellingen op basis van historische storingsgegevens. Daarvoor moet echter wel een geschikt model gekozen worden om de historische

data te benaderen. Daarnaast is er behoefte aan voorspellingen voor de lange termijn, ter ondersteuning van meer strategische beslissingen. Daarvoor is een onderbouwde methode nodig om de historische storingsdata door te trekken naar de toekomst, waarover nog geen data beschikbaar is. De vertaling van leidinginformatie naar storingsgedrag met behulp van Comsima is één manier om het

kiezen van een curve en de extrapolatie ervan te onderbouwen.

Aanpak: inzicht in lange termijn storingsgedrag via kennis van onderliggende processen

Om de keuze voor een geschikt model te ondersteunen met kennis van de fysische processen achter leidingdegradatie is conditie(reken)model Comsima ingezet. Het rekenmodel Comsima bepaalt of de conditie van een leidingsegment voldoet op basis van een ingevoerde beschrijving van de belastings- en liggingssituatie. De verouderingsmodule van Comsima laat zien hoe deze situatie, en daarmee de conditie, verandert met de tijd. Door het model te voeden met de spreiding in situaties van een groep leidingen – asbestcementleidingen in het drinkwaterdistributienetwerk van Brabant Water – is het storingsgedrag van deze groep gemodelleerd. Het gemodelleerde storingsgedrag is vergeleken met gemeten storingsgedrag, verkregen uit de storingsdatabase USTORE om te controleren of het model voldoende overeenkomt met de werkelijkheid om met vertrouwen voorspellingen over toekomstig storingsgedrag te kunnen doen.

Resultaten: voorspelling Comsima komt overeen met historische data, maar is gevoelig voor invoer

De gevoeligheidsanalyse laat zien dat het model Comsima beter met de historische data overeenkomt, wanneer het gevoed wordt met goede praktijkdata. De kwaliteit van de praktijkdata wordt bijvoorbeeld beter door:

- rekening te houden met kwaliteitsverschillen in leidingen die worden veroorzaakt bij de productie in plaats van uit te gaan van cataloguswaarden;
- niet alleen uit te gaan van metingen aan buizen die uitgenomen zijn omdat ze defect waren;
- zoveel mogelijk rekening houden met waarden die met de tijd veranderen, zoals de drinkwatersamenstelling.

De modelvoorspellingen van Comsima komen qua orde van grootte en vorm goed genoeg overeen met de historische data om een keuze voor extrapolatie te ondersteunen. Desalniettemin blijft de extrapolatie van storingsdata gebaseerd op verregaande vereenvoudigingen: dit is met de huidige beschikbaarheid van data onvermijdelijk.

Toepassing: conditie voorspellen is veelbelovend, inspanning nodig voor verzamelen praktijkdata

De aanpak om toekomstige storingsfrequenties te voorspellen vanuit een conditiemodel lijkt veelbelovend. Wel is duidelijk dat een dergelijke aanpak in de toekomst veel van de drinkwaterbedrijven zal vragen met betrekking tot het verzamelen van praktijkdata.

Rapport

Dit onderzoek is vastgelegd in het rapport *Toepassing methodiek voorspellen toekomstige storingsfrequenties: resultaten van een pilot met AC* (BTO 2019.050).

Meer informatie

dr. Ir. K.A. (Karel) van Laarhoven
T 030- 6069697
E karel.van.laarhoven@kwrwater.nl

KWR
PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands



Inhoud

<i>BTO Managementsamenvatting</i>	1
1 Inleiding	3
1.1 Motivatie	3
1.2 Doel	3
1.3 Werkwijze	3
2 PREDICTING FUTURE FAILURE RATES OF PIPES AS A GROUND FOR STRATEGIC ASSET MANAGEMENT	5
2.1 Abstract	5
2.2 Introduction	5
2.3 Methodology	6
2.4 Results and discussion	7
2.4.1 Characteristics of the pilot dataset	7
2.4.2 Results of the Monte Carlo simulations	8
2.4.3 Bias in the condition assessments	9
2.4.4 Homogeneity in the group of pilot pipes	10
2.4.5 Variability of input over time	11
2.5 Conclusions	12
3 Beoordeling van methodieken voor het voorspellen van toekomstige storingsfrequenties	14
3.1 Inleiding	14
3.2 Het kiezen van een cohort (stap 1)	14
3.3 Degradatie op basis van kennis van conditie van leidingen (stap 2)	15
3.3.1 Benadering en aannames	15
3.3.2 Invoer Comsima	16
3.3.3 Gevoeligheidsanalyse van de uitvoer van Comsima	19
3.4 Fitten van statistische modellen (stap 3)	22
3.4.1 Aannames	22
3.4.2 Lessen uit de toepassing bij Waterbedrijf Groningen	24
3.4.3 Toepassing op de data van Brabant Water	25
4 Reflecties en aanbevelingen van internationale domeinexperts	27
5 Conclusies en aanbevelingen	28
5.1 Conclusies	28
5.2 Aanbevelingen	29
6 Referenties	31

1 Inleiding

1.1 Motivatie

Het voorspellen van storingsfrequenties is een belangrijk element voor het bepalen van saneringsvolumes en prioritering van saneringen. De voorspellingen worden gebruikt voor prioritering van leidingsaneringen en worden meegenomen bij het schatten van ontwikkelingen in operationele kosten (OPEX), OLM en risico. Dat betekent dat onzekerheden in de voorspellingen een grote impact kunnen hebben op het investeringsbeleid (CAPEX) van de drinkwaterbedrijven en op welke vervangingsprojecten wanneer worden uitgevoerd.

Er zijn verschillende softwarepakketten die door de drinkwaterbedrijven gebruikt worden voor de ondersteuning van saneringsbeslissingen op de korte termijn (enkele jaren vooruit). Deze kennen elk hun eigen manier om toekomstige storingsfrequenties te voorspellen. Eerder onderzoek heeft laten zien dat de vorm van de degradatiecurve (de curve waarmee historische storingsdata wordt geparametriseerd: lineair, kwadratisch, exponentieel, samengesteld, etc.) van invloed is op het rekenresultaat van deze software en dat de resultaten met tientallen procenten uiteen lopen (Beuken et al., 2016). Voor voorspellingen op de langere termijn (tientallen jaren vooruit) is het bovendien de vraag of de degradatiecurves uit de beslissingsondersteunende software doorgetrokken mogen worden, want deze curves worden typisch gekozen vanwege hun capaciteit om de vorm van de beschikbare storingsdata goed te vangen, maar niet op basis van een beschrijving van het toekomstige proces.

Er blijkt tot nu toe maar zeer beperkte onderbouwing te zijn om voor een specifieke degradatiecurve te kiezen (Scheidegger et al., 2015). In eerder BTO-onderzoek (van Vossen en van Laarhoven, 2017) is daarom een methodiek beschreven vanuit het UKNOW-raamwerk. UKNOW is gericht op het optimaal combineren van informatie en het vergroten van betrouwbaarheid. De geformuleerde methodiek is gebaseerd op het combineren van storingsgegevens, het conditiemodel Comsima (Wols en Moerman, 2017) en gegevens over leidingdegradatie en liggingsomstandigheden.

Comsima berekent de spanningen in een leiding op basis van leiding- en omgevingskenmerken en bepaalt wanneer de spanning ontoelaatbaar wordt. Door dat moment gelijk te stellen aan een storing kan een degradatiecurve worden verkregen. De vorm van de degradatiecurve zoals benaderd door Comsima wordt bepaald door de processen die storingen veroorzaken (bv. wanddegradatie of zetting) en door de manier waarop belastingsomstandigheden en liggingsomstandigheden variëren. De vraag is of de beschikbare data en kennis van degradatieprocessen voldoende zijn om toe te passen bij het voorspellen van toekomstige storingsfrequenties van leidingen, dan wel op zichzelf, dan wel bij het extrapoleren van storingsgedrag uit historische storingsdata.

1.2 Doel

Het doel van het in de voorliggende rapportage beschreven project is om middels het uitvoeren van een pilot, de methodiek voor het voorspellen van toekomstige storingsfrequenties verder te uit te werken en de mogelijkheden en beperkingen van de methodiek te onderzoeken en aanbevelingen te geven voor verdere ontwikkeling.

1.3 Werkwijze

Gedurende het project is de pilot uitgevoerd. De methodiek zoals hier gepresenteerd is dusdanig nieuw voor Nederland en internationaal zo weinig toegepast dat we actief de discussie met internationaal erkende deskundigen hebben gezocht. Daarom zijn de methodiek en de resultaten van de pilot gepresenteerd op CCWI (International Computing and Control for the Water Industry Conference) in Exeter (2019) en LESAM (leading Edge

Strategic Asset Management) in Vancouver (2019). Het artikel voor LESAM staat in Hoofdstuk 2 en de resultaten van de afstemming met peers staat in Hoofdstuk 4. Omdat niet alle opgedane inzichten van dit project pasten in het conferentieartikel, is gekozen om in Hoofdstuk 3 de overige resultaten te beschrijven. In Hoofdstuk 5 staan de conclusies en aanbevelingen.

2 PREDICTING FUTURE FAILURE RATES OF PIPES AS A GROUND FOR STRATEGIC ASSET MANAGEMENT

Gepubliceerd als conference proceeding, LESAM 2019, Vancouver, CA.

J. van Vossen-van den Berg¹, K. van Laarhoven¹, B. Hillebrand¹, R. Diemel²

¹ KWR Water Research Institute, PO Box 1072, 3430 BB, Nieuwegein, The Netherlands

² Brabant Water, Magistratenlaan 200, 5223 MA, 's Hertogenbosch, The Netherlands

2.1 Abstract

The number of pipe failures occurring in a year is often an important performance indicator within the asset management of drinking water networks. Being able to predict the development of pipe failures of an ageing network into the future is therefore of vital importance for the assessment of future performance of the assets and investment requirements. We model pipe degradation in a Monte Carlo approach using the Comsima tool for modelling pipe response to stresses. We compare the modeling results to historical failure data for a pilot data set of AC pipes of a Dutch drinking water utility. The input data used for the Monte Carlo simulation failure data were from the same group of pipes, hence internally consistent. This pilot application shows the method can be used to assess which processes are dominant in explaining observed failure behavior. The method can also be used to assess the homogeneity of groups of pipes and isolate the best grounds to select groups of pipes. This in turn results in a better understanding of required improvements in the physical model. The results are very sensitive to bias in the input parameters, especially leaching rates in the case of AC. This means that in case of a lack of sufficient data application of the method to the entire distribution network is more difficult. This is the first application of the method and the results are promising, giving us new insights in data quality and characteristics of the pipes. The next step is application to more pilot areas both for AC, but also other pipe materials.

Keywords: future failure rates, pipe network, degradation, statistical model, physical model.

2.2 Introduction

One of the most important and at the same time most difficult decisions in asset management of pipe networks is defining the optimal moment of replacement. The number of pipe failures occurring in a year is often an important performance indicator within the asset management of drinking water networks. Being able to predict the development of pipe failures of an ageing network into the future is therefore of vital importance for the assessment of future performance of the assets and investment requirements. When drinking water companies register failure data, extrapolating current failure rates into the future often works well on the short term (for example 5 to 10 years). While prioritizing projects may work well in this approach, it is not enough to estimate the effects of investment strategies in terms of company values such as number of failures, investment costs and general asset performance. For this we require extrapolating horizons of around 30 years, which is the time horizon we focus on in this paper.

Many methods for predicting future pipe failure rates are based on fitting a probability distribution through pipe failure data (Kleiner and Rajani, 2001, Scheidegger et al., 2015). Available historical failure data typically are heavily censored and encompass only a fraction of the typical lifetimes attainable by assets. Therefore, the choice for a specific probability distribution is difficult to substantiate. Moreover, fitting the total distribution of possible lifetimes on data from only a small lifetime interval causes high uncertainties.

Physical models that describe pipe degradation help substantiating the extrapolation of failure rates (Rajani and Kleiner, 2001), since their behaviour beyond the data interval is informed by understanding of the underlying processes. These kinds of models generally require detailed local data describing both the pipes and their surroundings, making it an arduous and expensive task to apply these models to networks of pipes. For predictions about the behavior of a network as a whole, a useful compromise may be to combine physical models with described distributions of parameter values in Monte-Carlo simulations (Davis et al., 2006; Davis et al., 2007; Punurai and Davis, 2016, Wols et al., 2018).

In this paper we compare results from such a Monte Carlo approach with failure data and investigate the potential of this type of approach in the prediction of future failure rates in a pilot for the asbestos cement (AC) pipes of a Dutch drinking water utility, see also Laarhoven et al. (2019), where the method was discussed. Importantly, the input data used for the Monte Carlo simulation were from the same pilot area as the failure data, making sure that model parameters and failures were internally consistent.

2.3 Methodology

We use a physical model to estimate failure behavior of pipes in a pilot area. As described in more detail below, the model is provided with input parameter values in the form of probability distributions based on condition assessments from the pilot area. The resulting modeled failure behavior is then compared to historical failure data from the same pilot area. We performed sensitivity tests to estimate possibilities and limitations of the method.

Physical model

In the physical model for failure behavior, time dependent stresses in pipes due to loading and degradation are calculated and compared to the yield strength of the pipe material. It is assumed that the time of failure corresponds to the time the yield strength is reached anywhere in the pipe. The calculations are performed with Comsima (Wols et al., 2018, Wols and Thienen, 2015), a framework that combines models for semi-static loading situations (water pressure, soil load, traffic), long-term dynamic loading situations (differential soil settlement) and material degradation (leaching). Short-term dynamic loads such as those due to surges and transients are not modeled.

The degradation model for AC, specifically, simplifies the effects of leaching to be represented by a constant, homogeneous, annual reduction in the effective wall thickness. The reduction has an internal and an external component which can be defined individually, thereby allowing for separating the effects of drinking water and soil composition.

The model is used in a Monte Carlo simulation to model the characteristic failure behavior of pipe segments. Upon failure, it is assumed a pipe segment is removed from the network and replaced. This means that the horizontal length scale a failure represents must be chosen with care so that it corresponds to the amount of pipe that is typically replaced after failure in reality. A cumulative distribution function for failure time is obtained by counting the number of repetitions that fail for each age category. By calculating the hazard function from this, the failure rate of a characteristic unit as a function of age is obtained.

The pipes, degradation and area characteristics are described using probability density functions, from which samples are drawn in a Monte Carlo simulation. For AC the most important parameters used are initial wall thickness, leaching (both internal and external) rates and differential settlement.

Pilot data

The pilot focusses on the AC pipes of Dutch drinking water utility Brabant Water. These pipes have a combined length of approximately 6300 km, with most pipes having a 100 mm diameter. In The Netherlands, most drinking water companies have been registering their failure data in a joint database since 2010 (with a start-up phase in 2009) according to a uniform data model and with a uniform quality standard, USTORE (Moerman et al. 2017). For the pilot area, 3307 AC failures, registered from 2010 to 2017, are available in the database.

Brabant Water employs an Asset Condition Assessment program for its AC pipes. Pipes that are removed during failure repair or prior to (possible) renewal projects are subjected to detailed analysis. Amongst other things, the real pipe wall thickness is determined; internal and external degradation of the pipes is measured with thymolphthalein tests. In total, data of 1271 assessments were available from the pilot area. These data served to describe the spread in pipe properties as input for Monte-Carlo simulations with the physical model.

Average and maximum internal water pressures for individual pipes in the pilot area were inferred from a hydraulic model.

Dutch drinking water utility PWN contributed detailed data on the differential soil settlement rates of different soil types, based on satellite InSAR satellite data (Skygeo, Delft, the Netherlands). Under the assumption that the behavior of similar soil types in different parts of the Netherlands are comparable, these data served to describe the spread in soil properties as input for Monte-Carlo simulations with the physical model. In general, there are differences between the area of PWN and the pilot area, but the overall settling rates for the 2 areas are comparable up between 0 and 2 cm per year. For pipe failures the differential settlement rates are more important than overall settling rates, these are largest near changes in soil type and near dikes (as polder boundaries). Using the dataset of PWN most likely overestimates the differential settling rates in the pilot area, but for the sensitivity tests in this paper, the data are representative enough. For future applications it is advised to use local settlement data.

2.4 Results and discussion

2.4.1 Characteristics of the pilot dataset

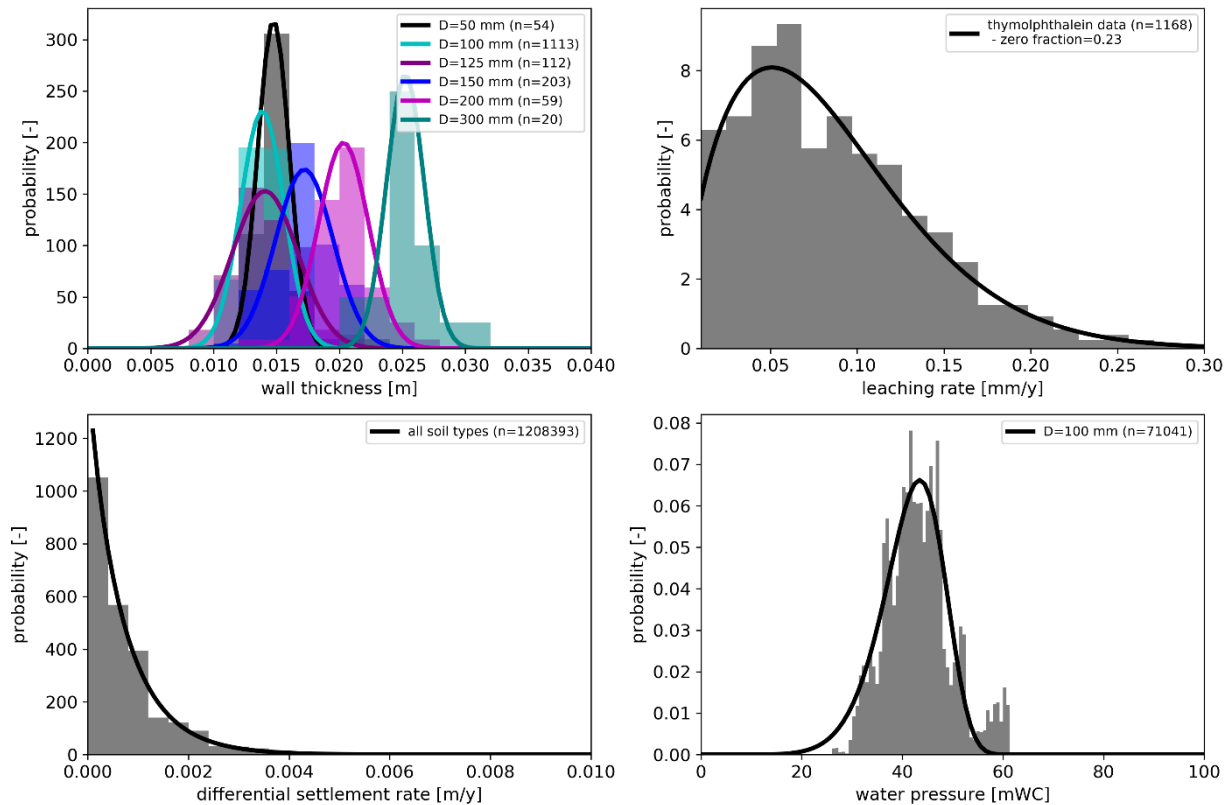
We focus on the parameters wall thickness, leaching rates, differential soil settlement and internal water pressure. Figuur 2-1 shows the distributions of these parameters in the pilot data. Figuur 2-1a shows the distribution of wall thickness for several diameters. The number of data for a diameter of 100 mm is by far the largest in the dataset. The wall thickness distributions for diameters 50 mm, 100 mm and 125 mm do not differ much, indicating suppliers have used a minimum wall thickness of around 12 mm regardless the diameter of the pipe. Interestingly, the distributions show quite a large spread with for example for diameters of 100 mm, the data show a range between 8 and 18 mm wall thickness. With average leaching rates of between 0 and 0.25 mm/year, this leads to large differences in expected life time before failure.

Figuur 2-1b shows the total leaching. Striking in the distribution of data is that around 20% of the pipes in the dataset have not experienced any leaching. The data of pipes that do experience leaching show an asymmetrical distribution towards higher leaching rates. As leaching is the cause of material degradation in the simulations, many pipes will show no degradation at all.

Figuur 2-1c shows the inferred differential settlement in the pilot data. What is immediately clear is the asymmetry in the distribution with most pipes experiencing no or very limited differential settlement and some pipes

experiencing differential settlement rates. Combining the distributions of leaching and differential settlement we can expect from the model simulations a degradation curve that after a certain age the curve will flatten due to a group of pipes experiencing no degradation due to either material degradation or differential settlement. This is in agreement with results from for examples Davis et al. (2006, 2007).

Figuur 2-1d shows the average internal water pressure on an average day, determined from a hydraulic model. Average pressures vary between 0.4 and 0.6 MPa, which is common for the Netherlands.



Figuur 2-1 Probability density functions fitted to the the pilot data set with (a) the wall thickness distributions for several pipe diameters, (b) total leaching rates for 100 mm diameter pipes, (c) differential settlement rates and (d) average internal water pressure.

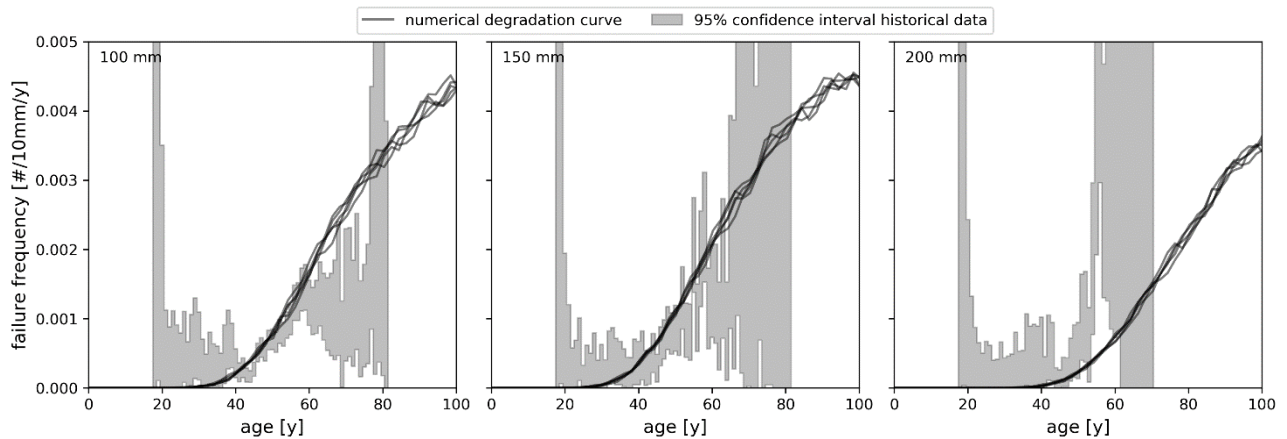
2.4.2 Results of the Monte Carlo simulations

Figuur 2-2 shows the degradation curves estimated by Comsima using the leaching rates from the general condition assessments, differential settlements for all soil types and the pressure distribution over the entire pilot area. The figure shows data for 100 mm, 150 mm and 200 mm AC pipes. The historical failure data show that the most reliable calculated average failure rates are found in the age range between 40 and 65 years. All diameters show a similar shape in the failure rates as a function of age, i.e. few failures for young pipes, then an interval in which failure rates increase with age, followed by an interval in which failure rates remain fairly constant (except for the largest diameter for which the data are too uncertain for interpretation after an age of around 55 years).

The Comsima results similarly show an interval of very few failures followed by an interval of increasing failure rates. This interval of increasing failure rates continues to much higher ages than the failure data suggest. Only after ages of around 80 years a mild flattening of the degradation curve is visible, whereas in the failure data this already occurs around 60 years.

Figuur 2-2 also shows that the agreement between failure rates calculate from historical failure data and simulation results is better for the smaller diameter pipes. Possibly, this is caused by the lack in data for larger diameters (in comparison, for 100 mm 1113 condition assessments were available compared to 203 for a diameter of 150 mm and 59 for a diameter of 200 mm).

To understand this difference in behaviour the next paragraphs show the results of sensitivity tests for biases in the input parameters, variability of parameter values over time and homogeneity of the pilot group of pipes.

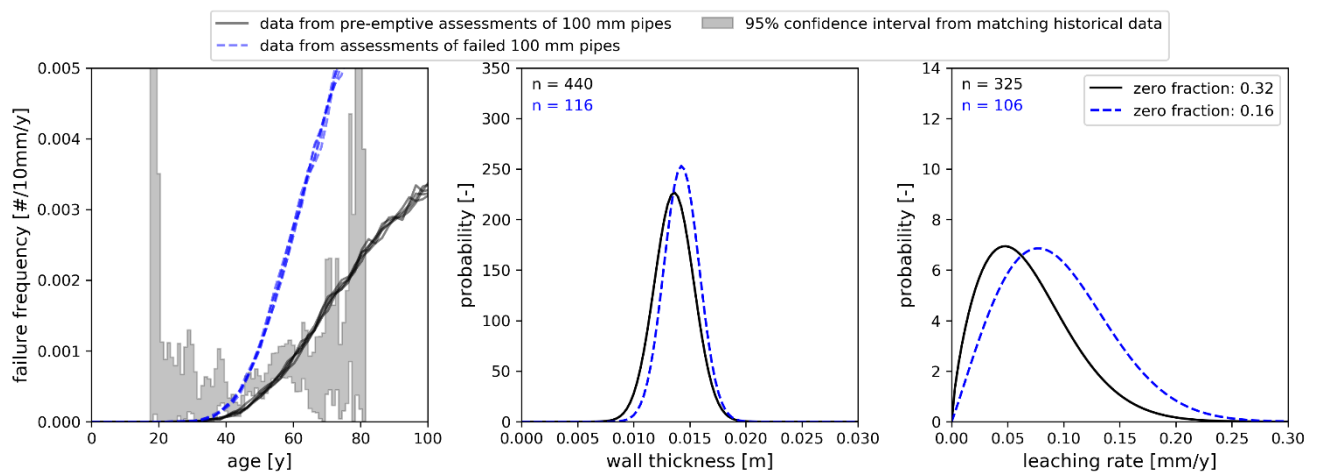


Figuur 2-2 Estimated degradation curves from Comsima and calculated failure frequencies from failure data for three pipe diameters (100 mm, 150 mm and 200 mm). In grey the 95% confidence interval assuming a homogeneous Poisson distribution for the likelihood of failure for each age category.

2.4.3 Bias in the condition assessments

Bias in the data can occur due to non-random sampling of the pilot area. In general, condition measurements in the pilot area are performed after failures (verification tests), after other network activities and pre-emptively after requests of external parties to participate in activities (decision support tests). A dataset based on failed pipes most likely leads to an overestimation in the numerical failure rates, more so than in a dataset based on pipes that are assessed to support decision making.

Figuur 2-3 shows the results of a sensitivity tests using only condition assessments after failures and using only decision support tests. Figuur 2-3 shows the differences in distributions for the leaching rates, the initial wall thicknesses and the resulting degradation curve compared to the calculated failure frequencies from the failure data set. The initial wall thickness only shows minor differences between the two datasets, it can be noted that the initial wall thickness for decision support measurements is slightly lower than for failed pipes. This is not true for the leaching distributions, with the group of data from failures having a bias towards higher leaching rates then the decision support condition assessments. The impact of these differences on the Comsima results are striking. Using the dataset with verification condition assessments measured after failures results in much higher estimated hazard for older AC pipes than using the dataset with decision support condition assessments. This illustrates the importance of having a general condition assessment measuring program instead of primarily measuring condition after failures.



Figuur 2-3 Effects of using a dataset with the condition tests performed after failures (verification tests) and pre-emptive condition assessments (decision support tests). The figure shows the failure data, the two degradation curves, the initial wall thickness distributions and leaching rates.

2.4.4 Homogeneity in the group of pilot pipes

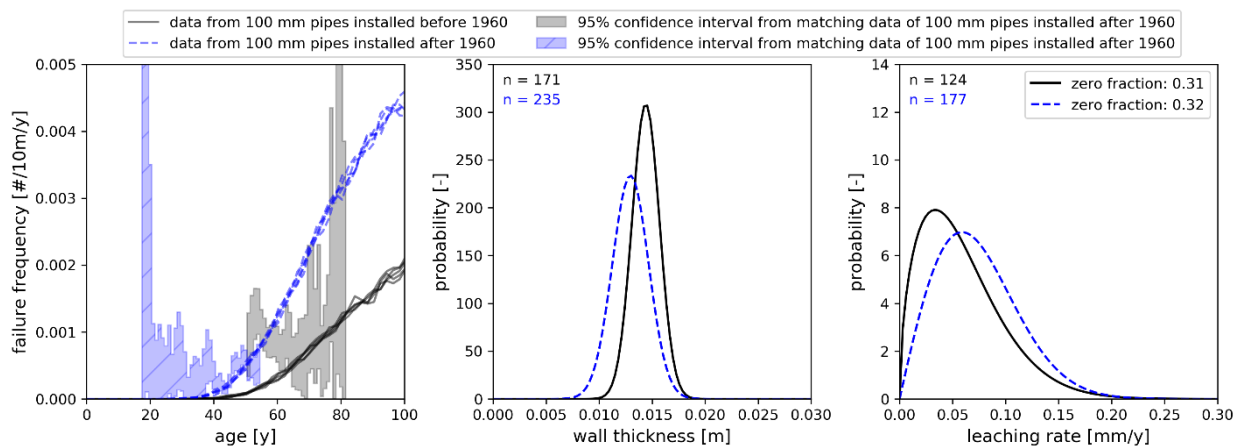
In the Netherlands a distinction is often made between AC pipes made before or after the period 1960-1965. The reasoning for this is that (i) a change in failure behavior appears to be visible in failure frequencies and (ii) there were changes in suppliers (Beuken & Mesman, 2015). In Figuur 2-2a we see that indeed around an age of 55 years (corresponding to around the 1960-1965 period) a change in the degradation curve is visible even when taking into account that the reliability of the failure frequencies is less for older pipes. Whereas for younger pipes, failure rates increase as a function of age, for older pipes the failure rates seem to stabilize as a function of age. To examine this we separated the two groups of data from the condition assessment data set in pipes installed before or after 1960. The results are visible in Figuur 2-4.

The historical failure data show that there seems a valid reason for a separation of the two groups of pipes. Because the separation is based on the year of installation and the historical failure data was collected over a period of 6 years, a short interval of pipe ages exists for which both categories have data. The fact that the 95% confidence intervals during this interval do not coincide is an indication that the separation is justified.

The initial wall thickness is larger for pipes installed before 1960, with an average around 15 mm rather than 12 mm for the younger pipes. Also, the distribution is more narrow, the maximum wall thicknesses are similar, but for the pipes installed after 1960, the distribution continues to smaller values for the initial wall thickness than for pipes installed before 1960.

The leaching data as well show a clear difference between the two groups of pipes. Pipes installed after 1960 show significantly higher leaching rates than the pipes installed before 1960.

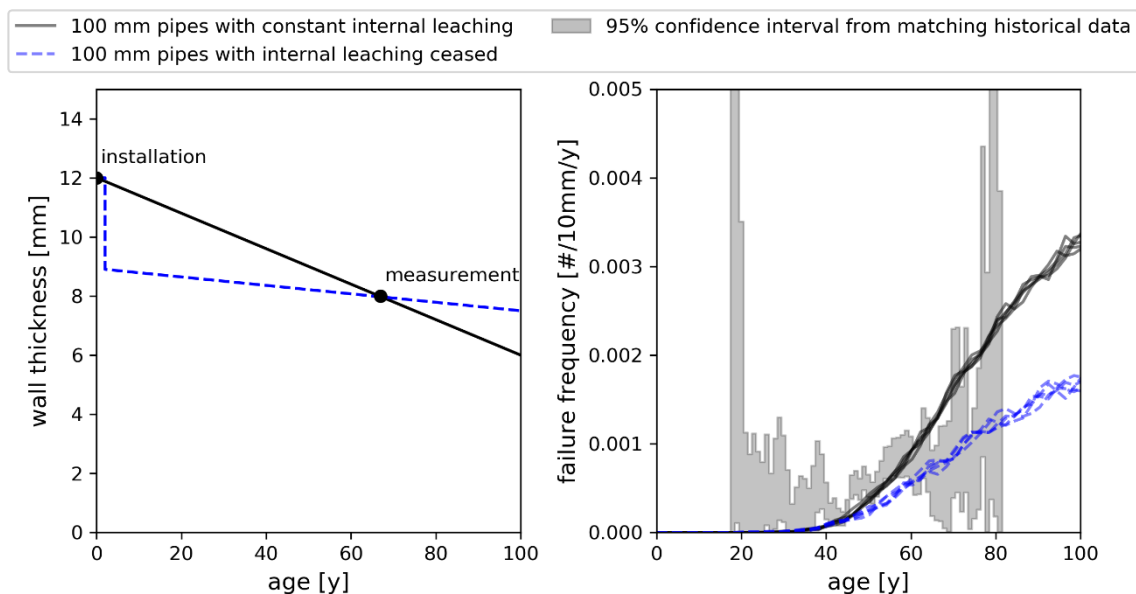
The combined effect of having both smaller initial wall thickness and higher leaching rates results in much higher (for similar ages) numerically estimated failure rates for the pipes installed after 1960 than for pipes installed before 1960. In fact, if we compare the two degradation curves with the historical failure data, we see that the degradation curves for pipes installed before 1960 seems to match best with the failure data for pipes with ages older than 65 years, whereas the degradation curve for pipes installed after 1960 seems to match best with the failure data for pipes with ages younger than 55 years. The period in between matches neither of the two degradation curves. This is an indication that whereas changes in the degradation properties around this period likely have occurred, the period in which they occurred may not be strictly one year as we assume in this test. More likely several effects combined over a period of time, resulting in an overall change in degradation behavior.



Figuur 2-4 Effects of separating the pilot group of pipes in pipes installed before or after 1960. The figure shows the failure data, the two degradation curves, the initial wall thickness distributions and leaching rates.

2.4.5 Variability of input over time

Bias in the parameter distributions can occur because of variability of parameter values over time. We show an example for changes in internal leaching rate. A common theory is that the internal leaching of the AC pipes is related to the SI (saturation index) of the drinking water, a measure for the aggressiveness of the water to the pipe material. In the '90s the water quality has significantly improved in the Netherlands and according to the values of SI since the '90s internal leaching should no longer occur. The results in Figuur 2-2 and Figuur 2-3 were generated assuming a total leaching rate constant over the lifetime of the pipe (including internal leaching). Figuur 2-5 shows the results of a simulation in which all measured internal leaching was assumed instantaneous at age 0, with afterwards total leaching rates equal to the external leaching rates. This results in higher amounts of leaching before the age of measurement and lower amounts of leaching for the remaining life of the pipe. The effect on the degradation curve is striking. Clearly, historical variability in leaching rates has a large impact on the estimated time to failure of a pipe.



Figuur 2-5 Effects of applying internal leaching continuously over the entire lifetime of the pipe or applying it instantaneously at installation. Note that in both cases external leaching is a constant rate over the entire lifetime of the pipe. The right figure shows the resulting degradation curves.

2.5 Conclusions

We showed results of a comparison between a Monte Carlo simulation of physical pipe degradation and historical failure data for a pilot data set of AC pipes of a Dutch drinking water utility. Combining both the knowledge about physical degradation processes with historical failure data has the potential to improve the prediction of future failure rates. Application to this pilot showed that we can use the method to assess which processes are dominant in explaining observed failure behavior. For example, using data with a bias in leaching rates results in very large differences in expected failure rates. We can also use the method to assess the homogeneity of groups of pipes and isolate the best grounds to select groups of pipes. This in turn results in a better understanding of required improvements in the physical model.

There are some issues when applying this approach in general. Because the results are clearly very sensitive to the input parameters, especially leaching rates, the data need to be unbiased and reliable. In general however, not all groups of pipes have enough data for application of this method (in this case, this was clearly the case for pipe diameters of 200 mm). It is strongly recommended to initiate a Condition Assessment Program in which the condition of random pipes in the network is measured in a systematic approach.

Another issue is limitations of group size. For example, large diameter pipes have a limited length in the pipe network and both failure and condition data may never be enough to reliably predict future failure rates in this method. For transport pipes this may not be a problem as these fall in a different risk category and are often treated differently when it comes to replacement strategies with less importance of the estimation of failure rates from similar pipes. For example, important transport links are sometimes monitored and inspected in-line before replacement. For other pipes it may be helpful to combine data from different areas.

Finally, the variability over time of input parameters, such as internal leaching rate, is important for the applicability of the method. In general however, this variability is poorly known and the impact of this variability on the actual parameters not well established. The uncertainty in the latter can be reduced. Metadata on the changes in supply areas are less easily obtained however and applications will most likely be limited to estimating bandwidths of solutions, which is still very useful to substantiate replacement strategies.

This was the first application of the method and the results were promising, giving us new insights in data quality and characteristics of the pipes. The next step is application to more pilot areas both for AC, but also other materials, such as CI and thermoplastic materials, such as PE and PVC.

REFERENCES

- Beuken, R.H.S., Mesman, G.A.M. (0215) *Actualisatie driehoeksverdelingen voor onderbouwing investeringsprognoses leidingen (in Dutch)*. BTO 2015.223, KWR, Nieuwegein, the Netherlands.
- Davis, P., De Silva, D., Marlow, D., Moglia, M., Gould, S., and Burn, S. (2006) *Failure prediction and optimal scheduling of replacements in asbestos cement water pipes*. Journal of Water Supply: Research and Technology. 57.4:239-252.
- Davis, P., Burn, S., Moglia, M., and Gould, S. (2007) *A physical probabilistic model to predict failure rates in buried PVC pipelines*. Reliability Engineering and System safety 92:1258-1266.
- Laarhoven, K. van, J. van Vossen-van den Berg, B. Hillebrand, E.J.M. Blokker and R. Diemel (2019). *Predicting future failure rates of pipe networks using a combination of physical degradation modelling and statistical inference*. 17th International Computing & control for the Water Industry conference, September 2019, Exeter, UK.

- Moerman, A., R.H.S. Beuken and B. Wols (2017) *Review on the development of uniform failure registration (USTORE) in the Netherlands*, LESAM 2017, Trondheim, Norway.
- Kleiner, Y. and B. Rajani (2001) *Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models*, Urban Water, Volume 3, 131-150.
- Punurai, W., and Davis, P. (2016) *Prediction of Asbestos Cement Water Pipe Aging and Pipe Prioritization using Monte Carlo Simulation*. Engineering Journal, Volume 2, Issue 2.
- Rajani, B. and Y. Kleiner (2001) *Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models*, Urban Water, Volume 3, 151-164.
- Scheidegger, A., J. Leitao and L. Scholten (2015) *Statistical failure models for water distribution pipes – a review from a unified perspective*, Water Research, Volume 83, 237-247.
- Wols, B.A., A. Moerman, P. Horst and K.A. van Laarhoven (2018) *Prediction of pipe failure in drinking water distribution networks by Comsima*, Proceedings – The 3rd EWAS International Conference on “Insights on the Water-energy-Food Nexus”. Lefkada Island, Greece, Volume 2, Issue 11.
- Wols, B.A. and P. van Thienen (2015). *Modeling the effect of climate change induced soil settling on jointed drinking water distribution pipes*. Computers and Geotechnics 70: 106-115.

3 Beoordeling van methodieken voor het voorspellen van toekomstige storingsfrequenties

3.1 Inleiding

In van Vossen en van Laarhoven (2017) zijn de stappen van de methodiek uitgewerkt om te komen tot een beter onderbouwde voorspelling van storingsfrequenties. De methodiek is gebaseerd op twee aspecten, namelijk het combineren van statistische extrapolatie van historische storingsregistraties en kennis over degradatie op basis van leidingkarakteristieken en data van de omgeving. De stappen van de methodiek zijn als volgt (van Vossen en van Laarhoven, 2017):

- 1 Het kiezen van een cohort met de daarbij behorende controle op voldoende data voor de gewenste betrouwbaarheid van de berekende storingsfrequenties.
- 2 Het kiezen van een degradatiecurve op basis van kennis over conditie van leidingen: voor de cohorten waar dit mogelijk is, het vertalen van de kennis over de conditie van leidingen naar een vorm voor de degradatiecurve. Dat betekent dat op basis van de uitkomsten van een Comsima-berekening (storingsfrequentie als functie van leeftijd) de meest geschikte statistische verdeling (of samenstelling van statistische verdelingen) wordt gekozen (bv. een normale verdeling, een Weibullverdeling, een exponentiële verdeling etc.).
- 3 Het fitten van de statistisch meest gangbare modellen en de op basis van Comsima bepaalde degradatiecurve op de berekende storingsfrequenties in de cohorten, inclusief extrapolatie naar leeftijden waar geen betrouwbare storingsfrequenties beschikbaar van zijn.
- 4 Het omrekenen van de gefitte storingsfrequenties naar een toekomstige storingsfrequentie van het betreffende cohort door rekening te houden met de verdeling van kilometers leidinglengte over de leeftijd van de leidingen en het vergelijken van de resultaten van de verschillende degradatiemodellen.

Dit onderzoek heeft zich gericht op het modelleren van een degradatiecurve met Comsima (stap 2) op basis van praktijkdata van een groep leidingen (stap 1), om te kijken of de resultaten de keuze voor een degradatiecurve inderdaad kunnen ondersteunen (stap 3). Stap 4 viel buiten de strekking van deze vraag en is niet verder uitgewerkt (één mogelijke aanpak is beschreven door Agudelo-Vera en Blokker, 2018). In onderstaande paragrafen worden de resultaten beschreven per stap.

3.2 Het kiezen van een cohort (stap 1)

De pilot voor deze studie bestaat uit de AC leidingen van Brabant Water, zie ook Hoofdstuk 2. De lengte van het AC-gedeelte van het distributieleidingnet van Brabant Water is ongeveer 6300 km. Van deze 6300 km vormen $\varnothing 100$ mm leidingen ongeveer 3000 km. Van deze leidingen was een storingsdatabase van 3307 storingsgegevens beschikbaar. Er is gebruik gemaakt van de gegevens zoals beschikbaar in de USTORE-database. Omdat het degradatiemechanisme in Comsima alleen de degradatie van AC beschrijft – en bijvoorbeeld niet over de aantasting van natuurrubber ringen in verbindingen – is de pilot beperkt tot de storingsgegevens op buisdelen. Daarnaast zijn storingsgegevens aangewezen als ‘veroorzaakt door derden’ of ‘veroorzaakt door aanlegfouten’ ook uit de dataset verwijderd. Er blijven dan 1991 geregistreerde storingsgegevens over, waarvan 1169 op 100 mm buisdelen.

Na de initiële gevoeligheidstests op basis van diameters (Figuur 2-2) zijn berekeningen met Comsima beperkt tot leidingen met een diameter van 100 mm, vooral omdat van deze groep verreweg de meeste data beschikbaar was.

Er is niet voor gekozen om in Comsima te werken met een verdeling over meerdere diameters - 'alle diameters < 250 mm naar rato' zou bijvoorbeeld een groep leidingen zijn die meer overeenkomt met de huidige stijl van cohorten (Beuken en Mesman, 2015). Een dergelijke aanpak is momenteel ongewenst omdat de verdeling van wanddikten afhankelijk is van de specifieke waarde van de diameter, zie ook Figuur 2-1. Om hier goed mee om te kunnen gaan is een aanpassing aan Comsima nodig.

Gedurende het project zijn verschillende deelgroepen van deze dataset als cohorten geanalyseerd:

- Cohorten op basis van leeftijd: een werkgroep van experts uit de sector heeft eerder vastgesteld dat er redenen zijn om een splitsing te maken tussen oudere en jongere AC leidingen met de grens rond 1965 (Beuken en Mesman, 2015). Deze clusters bevatten voor Ø100 mm leidingen voldoende data en zijn uitgewerkt, zie ook Figuur 2-4.
- Cohorten op basis van geografie:
 - Indeling op basis van voorzieningsgebied: in de storingsregistraties was deze informatie niet beschikbaar. Daarnaast kan een storing optreden in gebieden die bij meerdere voorzieningsgebieden horen. Deze indeling is daarom niet verder uitgewerkt.
 - Indeling op basis van gemeente: deze informatie was wel beschikbaar in de storingsregistraties, maar per gemeente zijn te weinig storingen opgetreden voor een betrouwbare analyse.
- Cohorten op basis van omgevingskenmerken:
 - Bodemsoort: de gedachte hierbij is dat de ligging in agressieve bodem invloed heeft op de uitlogingssnelheden. De bodemsoort is echter geen nauwkeurige parameter in de USTORE-dataset. Bijvoorbeeld, in steden is het niet duidelijk bij de aanduiding 'zand' of dit de bovenlaag bouwzand betreft of de ondergrond. Ook is niet aangegeven of zand al dan niet agressief is. Er is daarom alleen onderscheid gemaakt in de bodemsoorten 'zand', 'klei' en 'veen' en deze informatie is alleen gebruikt om gevoeligheid voor zettingsverschillen af te leiden.

3.3 Degradatie op basis van kennis van conditie van leidingen (stap 2)

3.3.1 Benadering en aannames

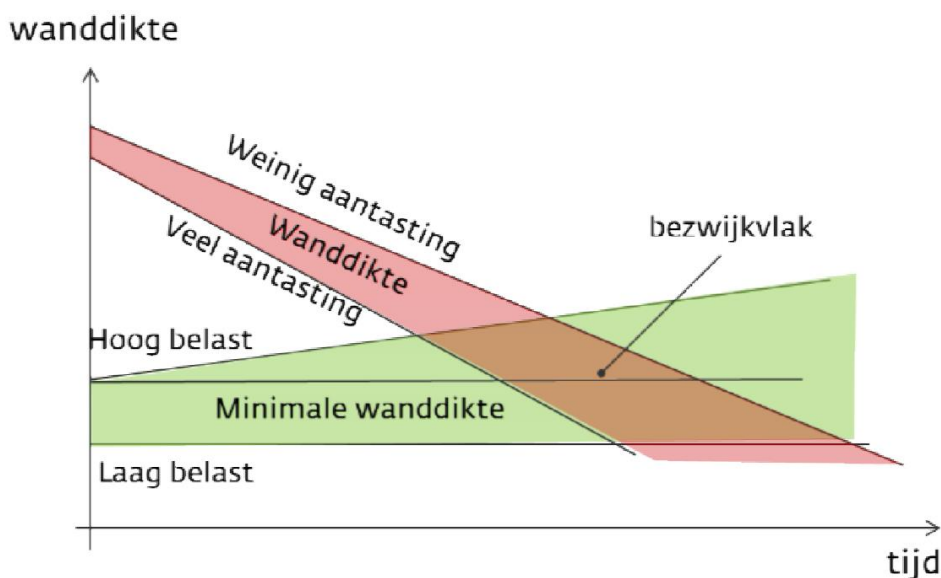
Comsima berekent op basis van specifieke leidinggegevens de spanningen in een individuele leiding en kan op die manier gebruikt worden om de huidige conditie van een reëel netwerk te schatten (Wols et al., 2016). Comsima is uitgerust met een Monte-Carlo module om de onzekerheid in de uitkomsten per leiding in te schatten (Wols en Moerman, 2017). Hiertoe wordt eerst een kansverdeling toegekend aan iedere invoerparameter, waarmee de onzekerheid in de waarde van die parameter wordt gerepresenteerd. Vervolgens wordt het betreffende leidingsegment meerdere malen doorgerekend, met voor iedere berekening een andere combinatie van de invoerparameters, bemonsterd uit de toegekende kansverdelingen (typisch 10.000 tot 100.000 keer voor een geconvergeerd resultaat). Uit de fractie van deze resultaten die de norm voor falen overschrijdt, kan een overlevingskans worden bepaald. Door deze stappen uit te voeren voor meerdere tijdstappen, waarbij de relevante parameters worden aangepast volgens een bepaald verouderingsmodel, kan een overlevingskans als functie van leeftijd worden verkregen. Uit een overlevingskans als functie van leeftijd kan vervolgens een storingsfrequentie als functie van leeftijd worden bepaald (van Vossen en van Laarhoven, 2017, van Laarhoven 2018). Dit principe is geïllustreerd in Figuur 3-1. Op deze manier kan de (theoretische) storingsfrequentie van één leiding worden benaderd.

Bovenstaande methode kan worden aangepast om het storingsgedrag van een cohort leidingen te bepalen. Hiertoe wordt, per invoerparameter, een kansverdeling gedefinieerd die de spreiding van waarden beschrijft die voorkomen in de verschillende leidingen in het cohort (in plaats van de onzekerheid in de waarde van één specifieke leiding). In de voorliggende studie worden deze verdelingen gebaseerd op informatie over het cohort uit bijvoorbeeld exitbeoordelingen. Wanneer de Monte-Carlo module nu varianten genereert door de verdelingen van

de verschillende invoerparameters te bemonsteren, worden fictieve segmenten gegenereerd die in het cohort voor zouden kunnen komen. De resulterende storingsfrequentie als functie van leeftijd beschrijft dan het typische storingsgedrag van een segment in het cohort. Bij de methode zoals toegepast gelden de volgende aannames (naast de aannames van het model Comsima):

- 1 Bij het vertalen van de Comsima-resultaten naar een degradatiecurve wordt opnieuw gesteld dat ieder gesimuleerd segment één keer stoort en dan uit de populatie verwijderd wordt (vergelijkbaar met aanname 4 in paragraaf 3.4).
- 2 De invoerparameters zijn onafhankelijk van elkaar (iedere combinatie van invoerparameters uit de verdelingen is realistisch). Dit is in praktijk niet altijd het geval. Wanddikte en leidingdiameter zijn bijvoorbeeld niet onafhankelijk. Er komen verschillende diameters en wanddikten voor in de huidige cohorten, maar niet iedere combinatie hiervan komt voor (in het cohort AC met $D < 250$ mm komen geen leidingen met $D = 200$ mm voor met wanddiktes die horen bij leidingen met $D = 65$ mm). Ook is het bijvoorbeeld denkbaar dat wanddikte en uitlogingssnelheden in de praktijk gecorreleerd zijn, zoals vanwege het gebruik van een dikkere buis in een locatie waarvan men wist dat de bodem agressief was. Ook dit is niet meegenomen.

Op basis van dit typische storingsgedrag kan vervolgens een geïnformeerde keuze worden gemaakt voor een bepaalde kansverdeling om storingsdata mee te fitten, zoals oorspronkelijk het idee in de aanpak in Van Vossen en van Laarhoven (2017). Daarnaast kan de degradatiecurve uit Comsima rechtstreeks met de gemeten storingsfrequenties worden vergeleken om het model te valideren en om verschillen in storingsgedrag tussen groepen te verklaren.



Figuur 3-1 Figuur overgenomen uit Wols en Moerman (2017). Veroudering in de vorm van afname van de effectieve wanddikte (rode vlak) en toenemende belastingen (bijvoorbeeld vanwege zettingen) die zorgen voor een toename van de vereiste wanddikte. Samen met betrouwbaarheidsmarges geven deze het moment van bezwijken (bezwijkvlak). Dit bezwijkvlak ligt waar de groene en rode vlakken elkaar snijden.

3.3.2 Invoer Comsima

Voor AC leidingen is de volgende invoer benodigd in Comsima, zie ook Hoofdstuk 2 en Wols en Moerman (2017):

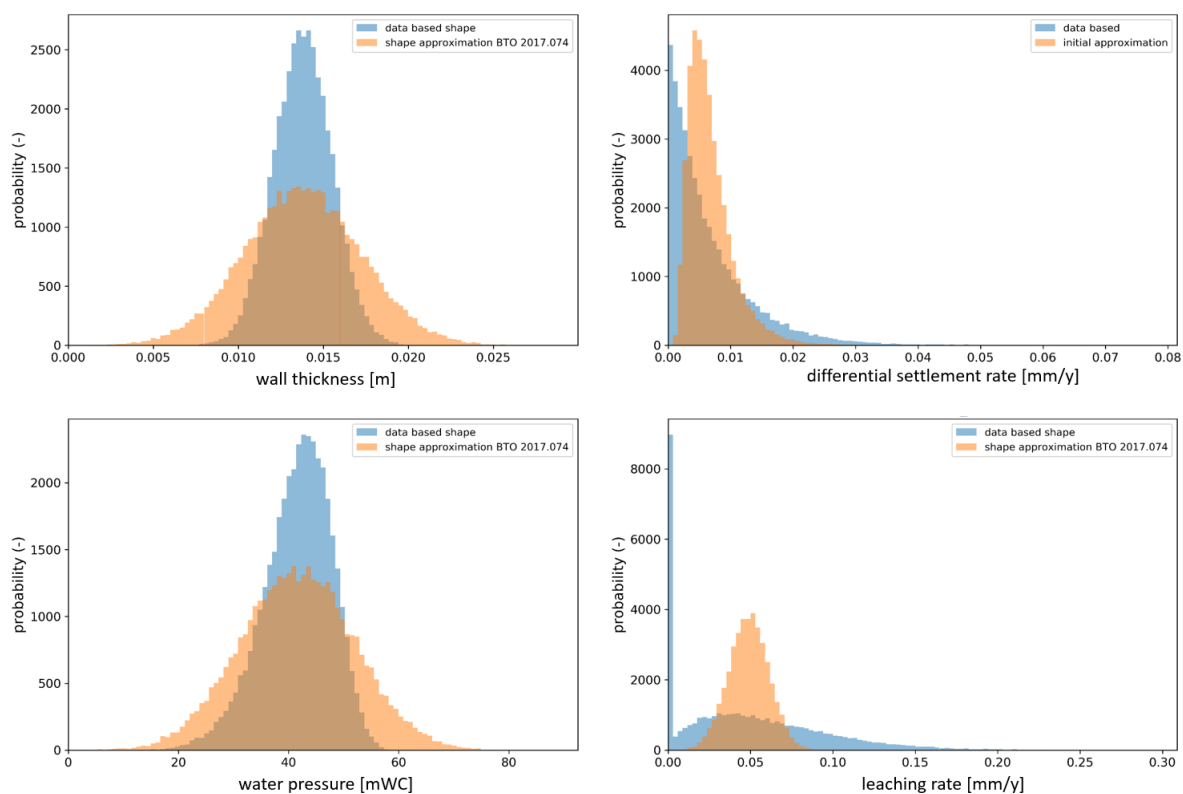
- diameter;
- originele wanddikte;
- uitlogingssnelheid;
- verkeersdruk;

- snelheden van verschilzettingen;
- interne waterdruk;
- diepteligging.

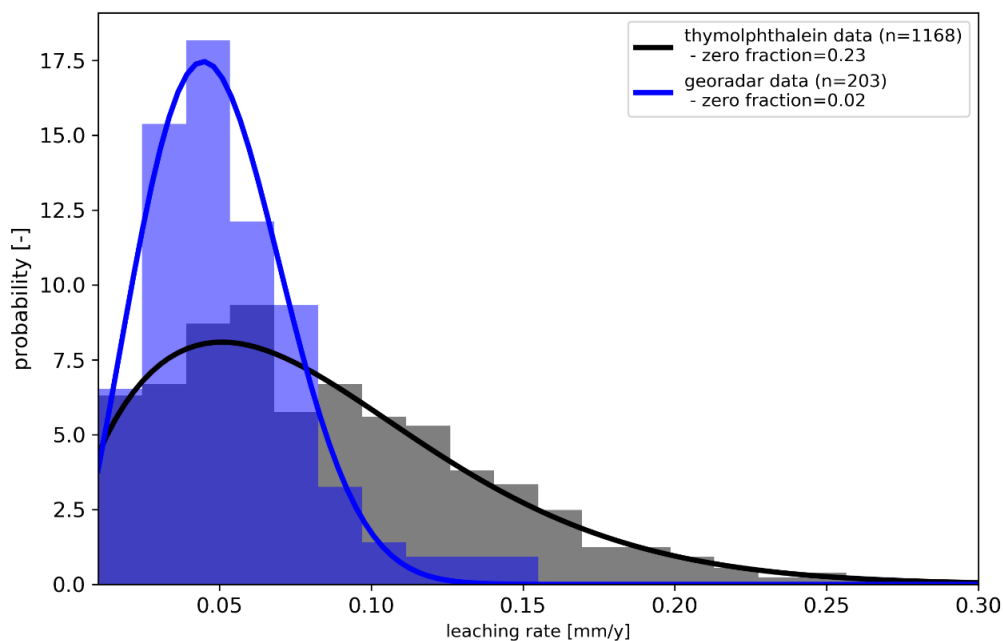
Bij aanvang van het project werden voor deze parameters standaard waarden met een spreiding volgens een Gaussische verdeling gebruikt (Wols en Moerman, 2017). In de voorliggende studie zijn deze verdelingen gebaseerd op praktijkdata uit het pilotgebied. De initiële aannames en de praktijkdata zijn vergeleken in Figuur 3-3 (de specifieke praktijkdata is in meer detail weergegeven in Figuur 2-1). De verdelingen voor zettingssnelheden en uitlogingssnelheden blijken verre van Gaussisch. In werkelijkheid zijn de verdelingen sterk asymmetrisch en heeft een aanzienlijk deel van de leidingen helemaal geen last van uitloging dan wel zettingsverschillen (merk de scherpe piek op 0 op in de uitlogingsdata). Daar staat tegenover dat een ander deel van de leidingen grotere uitlogingssnelheden en zettingsverschillen ervaart dan initieel aangenomen. Dit heeft tot waarschijnlijk gevolg in de analyses dat de degradatiecurve steiler is voor jongere leidingen, terwijl de degradatiecurve afvlakt richting een set 'overlevers' die geen uitloging en geen zettingen ervaren.

De interne waterdruk en de wanddikte laten een veel grotere spreiding over de populatie van het pilotgebied zien dan eerder aangenomen. Vooral de wanddikte heeft een groot effect, de combinatie van een variatie van wanddikte van 5 mm tot 23 mm en uitlogingssnelheden tussen 0 en 0,03 mm per jaar laten een spreiding zien in levensduur van tientallen tot mogelijk honderden jaren. De spreiding in wanddiktes wordt vermoedelijk veroorzaakt door een spreiding in gebruikte drukklasse en in het productieproces.

Voor het bepalen van de verdeling van uitlogingssnelheden was een dataset met metingen uit verschillende meetmethoden beschikbaar, namelijk thymolftaleïne-, georadar- en akoestische metingen (Echologics). De metingen zijn verricht op uitgenomen leidingdelen na storings, netwerkaanpassingen of preventief. De verschillende meetmethoden laten onderling grote verschillen zien (Figuur 3-3); gezien de dominantie van het uitlogingsproces is goede data belangrijk. Aangezien de dataset op basis van de thymolftaleïne-methode meer metingen bevatte en deze methode het best begrepen en gevalideerd is (van Laarhoven en van Summeren, 2019), is alleen deze data gebruikt in de verdere analyse.

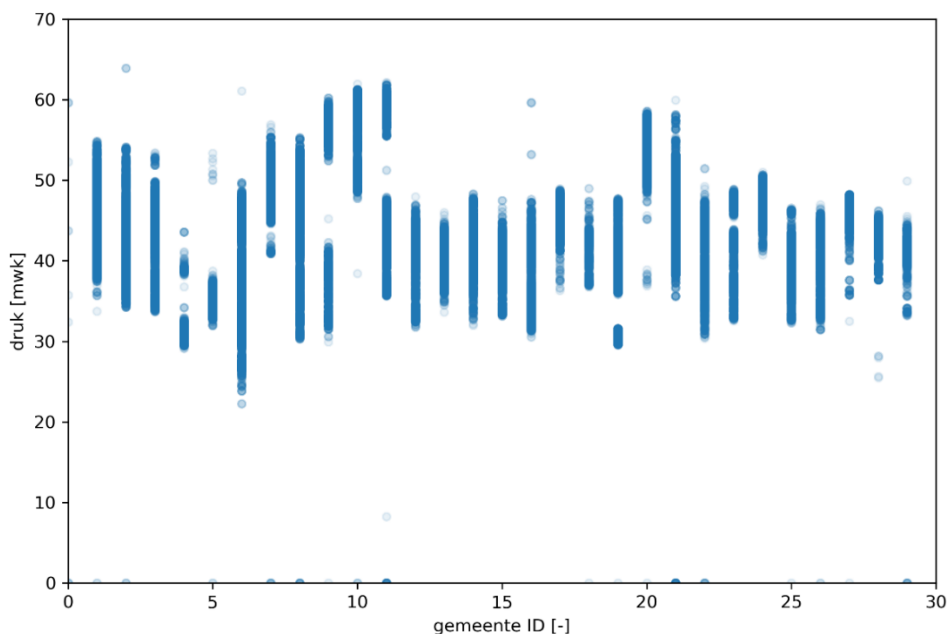


Figuur 3-2 Kansverdelingen voor de parameters wanddikte, zettingsnelheid, waterdruk en uitlogingsnelheid. De blauwe verdelingen zijn gebaseerd op de praktijkdata en zijn tijdens dit onderzoek gebruikt als invoer voor Comsima. De oranje verdelingen zijn de verdelingen die origineel werden aangenomen bij de ontwikkeling van Comsima's Monte-Carlo module (Wols en Moerman, 2017).



Figuur 3-3. Vergelijking van de verdeling in uitlogingsnelheden zoals gemeten met twee verschillende technieken: thymolftaleïne (zwart) en georadar (blauw). Voor de thymolftaleïne dataset geldt dat 23% van de buizen niet is uitgelooft (zero fraction = 0,23); voor de georadar set is dit 2% (zero fraction = 0,02). De georadardata suggereert dus een hoger percentage uitgelooft buizen. Daarentegen laat de thymolftaleïne data een verdeling zien waarin hogere uitlogingsnelheden vaker voorkomen dan in de georadardata. Deze observatie is consistent met observaties uit van Laarhoven en van Summeren (2019).

Figuur 3-4 laat de drukken zien per gemeente zoals gesimuleerd door een hydraulisch model voor een criteriumdag (een gemiddelde dag, aangepast met 10% meer verbruik). De drukken variëren tussen 20 en 65 meter waterkolom (mwk). De meeste gemeenten hebben een druk tussen 30 en 50 mwk. Gemeente 6 heeft een iets grotere spreiding met drukken vanaf 20 mwk. Gemeenten 7, 10, 20 en 21 hebben een iets hogere druk tussen 40 en 60 mwk. Gemeente 9 en 11 hebben een tweedeling met een deel van de gemeente tussen 30 en 45 mwk en een deel tussen 50 en 60 mwk. Deze verschillen waren door de beperkingen in invoerdata en storingsgegevens per gemeente niet mee te nemen in de Comsimasimulaties.



Figuur 3-4. Verdeling van drukken op een criteriumdag op verschillende leidingen per gemeente, op basis van hydraulische berekeningen van Brabant Water.

3.3.3 Gevoeligheidsanalyse van de uitvoer van Comsima

De gevoeligheid van de uitvoer van Comsima voor variaties in de invoer is onderzocht met een aantal gevoeligheidstesten. De volgende parameters bleven bij alle gevoeligheidstesten hetzelfde:

INVOERPARAMETER:	DATASET:
DIAMETER	100 mm
VERKEERSDRUK	Geen verkeer
INTERNE WATERDRUK	Volledige dataset druk hydraulische simulatie Brabant Water
FALEN LEIDINGONDERDELEN IN COMSIMA	Buisdelen via overschrijden bezwijkspanning
TYPE STORINGEN USTORE	Spontane storingen op buisdelen

Voor de verschillende gevoeligheidstesten werden de overige parameters als volgt gedefinieerd/gevarieerd: bij iedere gevoeligheidstest is aangegeven in dikgedrukte tekst welke parameterwaarden met elkaar zijn vergeleken. Bijvoorbeeld, bij de gevoeligheidstest over gecorrigeerde bezwijkspanning zijn twee simulaties (één met een bezwijkspanning van 50 MPa en één met een bezwijkspanning van 25 MPa) met elkaar vergeleken.

TEST PARAMETER	GECORRIGEERDE BEZWIJKSPANNING	LENGTESCHAAL SEGMENTEN	BIAS IN CONDITIE- METINGEN	KWALITEIT LEEFTIJD- GROEPEN	GESCHIEDENIS UITLOGING
BEZWIJK- SPANNING	50 MPa 25 Mpa	50 Mpa	50 Mpa	50 Mpa	50 Mpa
SEGMENT LENGTE	30 m	5 m 10 m	10 m	10 m	10 m
COMSIMA		30 m			
DATASET ZETTING		Zetting in alle bodemtypen met resolutie van 5 m			
	Zetting in alle bodemtypen met resolutie van 30 m	Zetting in alle bodemtypen met resolutie van 10 m	Zetting in alle bodemtypen met resolutie van 10 m	Zetting in alle bodemtypen met resolutie van 10 m	Zetting in alle bodemtypen met resolutie van 10 m
		Zetting in alle bodemtypen met resolutie van 30 m			
DATASET WANDDIKTE			Exitbeoordelingen n.a.v. storingen	Exitbeoordelingen ter conditiebepaling buizen vanaf 1964	Exit-beoordelingen ter conditiebepaling
	Alle beschikbare exitbeoordelingen	Alle beschikbare exit-beoordelingen	Exitbeoordelingen ter conditiebepaling	Exitbeoordelingen ter conditiebepaling buizen voor 1964	
DATASET UITLOGING			Exitbeoordelingen n.a.v. storingen	Exitbeoordelingen ter conditiebepaling buizen vanaf 1964	Exitbeoordelingen ter conditiebepaling
	Alle beschikbare exitbeoordelingen	Alle beschikbare exit-beoordelingen	Exitbeoordelingen ter conditiebepaling	Exitbeoordelingen ter conditiebepaling buizen voor 1964	Exitbeoordelingen ter conditiebepaling
GEDRAG INTERNE UITLOGING					Over de hele levensduur actief
	Over de hele levensduur actief	Over de hele levensduur actief	Over de hele levensduur actief	Over de hele levensduur actief	Uitloging opgelegd bij aanvang, geen verdere uitloging

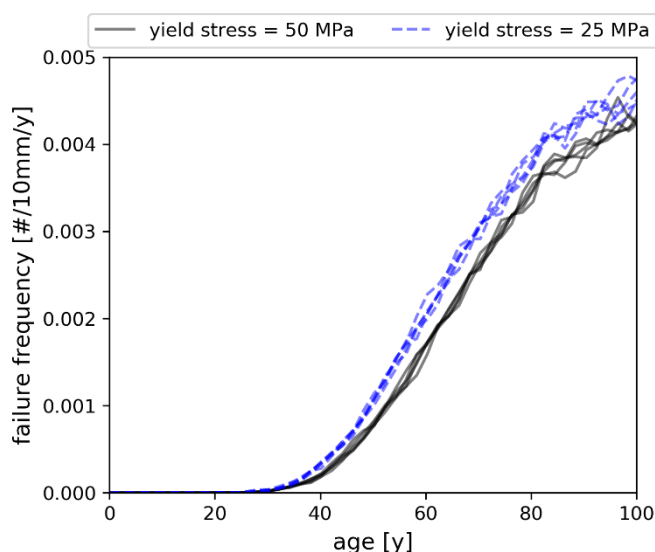
De resultaten van de gevoeligheidstesten over **bias in conditiemetingen**, **kwaliteit leeftijdsgroepen** en **geschiedenis van uitloging** worden beschreven in Hoofdstuk 2.4.3, 2.4.4 en 2.4.5. De overige resultaten van de gevoeligheidstests zijn hieronder beschreven.

Gecorrigeerde bezwijkspanning

Recent onderzoek naar de sterkte van AC leidingen suggereert dat deze minder sterk zijn dan tot nu toe werd aangenomen (Beuken en van Laarhoven, 2019). Om te testen welke invloed dit potentieel heeft op de degradatiecurve en het voorspellen van toekomstige storingsfrequenties, is in deze gevoeligheidstest de

bezuikspanning waar Comsima mee rekt gehalveerd. Figuur 3-5 laat de resultaten zien. Te zien is dat voor een lagere bezuikspanning hogere storingsfrequenties bij lagere leeftijden worden voorspeld. Dit is conform verwachting, omdat Comsima de bezuikspanning gebruikt om het einde van de levensduur te bepalen, namelijk het moment van storen. Dezelfde leiding zal bij een lagere bezuikspanning eerder storen dan bij een hogere.

Opvallend is dat het verschil over 100 jaar maar beperkt toeneemt. Eén mogelijke verklaring is dat de spanning in de wand kwadratisch of sneller met de tijd zal toenemen: de wanddikte neemt lineair af, waardoor het oppervlak van de buisdoorsnede waarover de belasting verdeeld wordt kwadratisch afneemt; daar bovenop komt dan nog een toename in belasting vanwege zettingen. De spanning zal hierdoor snel oplopen vlak voor het moment van falen, waardoor een halvering van het faalcriterium niet erg belangrijk zal zijn.



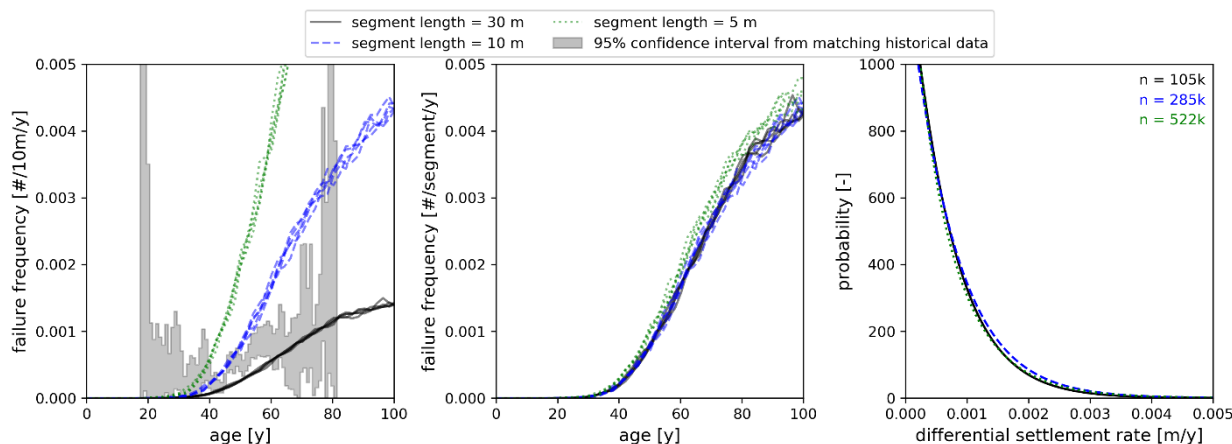
Figuur 3-5 Voorspelde faalfrequenties voor twee verschillende waarden van de bezuikspanning die geldt als het faalcriterium binnen Comsima.

Lengteschaal segmenten

De zettingsdata was beschikbaar met verschillende resoluties variërend van 5 meter in de lengterichting van de leiding, via 10 meter tot 30 meter. Vooral als er grote verschillen zijn in zettingssnelheden kan het een groot verschil maken in de spanning in de leiding of dezelfde zetting over een lengte van 5 meter of 30 meter optreedt. Figuur 3-6 laat de resultaten zien:

- Het rechterfiguur laat de distributies van de verschilzettingssnelheden zien voor de drie verschillende resoluties. Opvallend is dat deze distributies voor alle resoluties vrijwel hetzelfde zijn. Ook zijn de snelheden erg laag, ter vergelijking, de Nederlandse veenweidegebieden dalen gemiddeld zo'n 8 tot 10 mm per jaar.
- Het middelste figuur laat de faalfrequenties voorspeld door Comsima zien, uitgedrukt als het aandeel van de resterende segmenten dat ieder jaar stoort. Aangezien de curves bijna over elkaar vallen, kan geconcludeerd worden dat het belastingenmodel niet erg gevoelig is voor de verschillen in zettingssnelheden over afstanden van respectievelijk 5, 10 of 30 meter. Dit betekent dat de spanningen in buisdelen door de zettingen laag blijven. Eén verklaring is dat dit simpelweg voortvloeit uit de lage zettingssnelheden in de dataset, zoals hierboven benoemd. Een extra verklaring zou kunnen zijn dat het grootste gedeelte van de zettingen hier wordt opgenomen in de verbindingen, zonder dat de maximale hoekverdraaiing wordt bereikt, waardoor de spanningen in de buizen beperkt blijven.
- Als er wordt vergeleken met USTORE in het linker figuur, is het storingsgedrag uit Comsima weer vertaald naar het aantal storingen dat ieder jaar optreedt ten opzichte van de opgetelde lengte van de resterende

segmenten. Dit legt het effect bloot van de centrale aanname dat een segment maar één keer stort, en demonstreert het belang van een goed gekozen lengteschaal voor het segment: omdat het storingsgedrag van segmenten in dit model ongevoelig blijkt voor de verschillen in segmentlengte, schaalt het storingsgedrag per lengte-eenheid omgekeerd met segmentlengte. De zettingsverschillen met een resolutie van 5 meter geven duidelijk te hoge schattingen van de degradatiecurve.



Figuur 3-6. Comsima resultaten voor 100 mm buizen op 3 verschillende lengteschalen. Links: het effect van de segmentlengte op storingsfrequentie als storings per lengte-eenheid per jaar (Comsimare resultaten vertaald naar een vorm die vergelijkbaar is met Ustoredata). Midden: het effect van de segmentlengte op de storingsfrequentie als storings per segment per jaar (Comsimare resultaten). Rechts: de ingevoerde verdelingen van verschilzettingssnelheden voor de 3 lengteschalen.

3.4 Fitten van statistische modellen (stap 3)

Op hoofdlijnen is in van Vossen en van Laarhoven (2017) de aanpak beschreven waarmee historische storingsdata gefit wordt met een bepaalde kansverdeling. Eerst wordt de storingsdata omgevormd naar een verzameling van storingsfrequenties die horen bij groepen buizen met een bepaalde leeftijd. In deze vorm wordt de data vervolgens gefit met de hazardcurve (de momentane storingsfrequentie als functie van leeftijd van een kansverdeling, zie ook van Vossen en van Laarhoven, 2017) die hoort bij de kansverdeling. In het voorliggende onderzoek is in meer detail onderzocht welke modelaannames horen bij deze aanpak en welke implicaties die met zich meebrengen voor de toepasbaarheid. Vervolgens is de aanpak in een parallel project toegepast op de USTORE-storingsdata van Nederland en van Waterbedrijf Groningen om een gevoel te krijgen voor de praktische beperkingen en opbrengsten van deze stap (van Laarhoven, 2018).

3.4.1 Aannames

Bij de aanpak zoals toegepast horen de volgende aannames:

1. Het net wordt benaderd als een verzameling cohorten die elk bestaan uit een verzameling identieke segmenten die onafhankelijk van elkaar storen.
2. Het moment waarop een segment stort laat zich beschrijven als een toevalsvariabele die wordt beschreven door een bepaalde kansverdeling.
3. Het moment van storen voor segmenten uit verschillende aanlegjaren wordt met dezelfde kansverdeling beschreven (segmenten aangelegd in 1970 gedragen zich van 1970 tot 1980 bijvoorbeeld hetzelfde als segmenten aangelegd in 1990 zich gedragen van 1990 tot 2000).

4. Een segment stoort één keer en wordt dan verwijderd uit de verzameling (het segment wordt uit het net verwijderd of dusdanig aangepast via een reparatie dat het gedrag niet meer te vergelijken is met dat van het originele segment) oftewel: het segment is statistisch niet-repareerbaar.
5. Het aantal segmenten met een bepaalde verzameling eigenschappen (bijvoorbeeld een combinatie van materiaal, leeftijd, etc.) schaalt met de totale lengte van het distributienet dat die eigenschappen deelt.
6. De gecombineerde lengte van het aantal segmenten met een bepaalde leeftijd dat stoort in één jaar is dusdanig klein ten opzichte van de totale lengte van segmenten met die leeftijd dat de lengteverandering geen invloed heeft op de analyse.

Bij aanname 1 heeft het, wanneer de hoeveelheid storingsdata het toelaat, typisch de voorkeur om één type onderdeel als segment te kiezen, bijvoorbeeld alleen buisdelen, verbindingen of zelfs afdichtringen, omdat verschillende onderdelen hun eigen individuele degradatiecurve hebben. Dit betekent wel dat voor elk van die onderdelen storingsdata beschikbaar moet zijn. USTORE bevat op dit moment alleen het onderscheid tussen buizen en verbindingen en het is de vraag of dat voldoende onderscheid voor degradatiemechanismen biedt. Daarnaast is in dit geval aanname 5 belangrijk omdat de informatie over de opbouw van het leidingnet waarschijnlijk niet voldoende gedetailleerd is om iets te zeggen over bijvoorbeeld het precieze aantal verbindingen van een bepaalde leeftijd.

Als er onvoldoende storingsdata is voor ieder van deze onderdelen, kan ook gekozen worden voor een leidingsegment van een bepaalde lengte dat is opgebouwd uit een aantal verbindingen en buizen. Dan wordt gewerkt met een totale degradatiecurve voor het leidingsegment als geheel. Omdat in Comsima op dit moment alleen verouderingsmechanismen voor buisdelen zijn geïmplementeerd, is er in voorliggend project voor gekozen om alleen storingen op buisdelen mee te nemen in de analyse.

Het heeft de voorkeur om een segment met een korte lengteschaal te kiezen die overeenkomt met de typische omvang van een reparatie, zodat aanname 4 zo goed mogelijk aansluit bij de praktijk. Bovendien kan vanwege aanname 4 in de storingsdata alleen maar gewerkt worden met de éérste storing op een segment; voor grotere segmenten moeten opeenvolgende storingen op een zelfde segment weggefilterd worden voor de analyse (zie ook de ruimtelijke analyse hieronder). Tenslotte geldt voor kleinere segmenten ook dat het dan het waarschijnlijkst is dat aanname 6 gerechtvaardigd is.

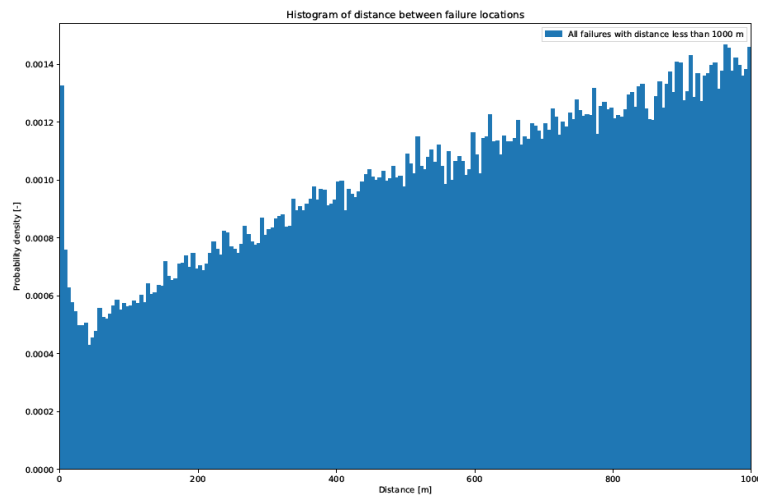
Bij aanname 1 is het ook van belang dat storingen onafhankelijk van elkaar optreden. In Figuur 3-7 is onderzocht of dit het geval is door een histogram te maken van de afstanden tussen ieder paar van storingen in de complete USTORE-dataset (niet alleen die van de pilot). Bij kleine, onafhankelijke storingskansen wordt een (bijna-)lineaire relatie tussen afstand en waarnemingsaantal verwacht. Deze relatie is zichtbaar voor afstanden vanaf ongeveer 50 m. Bij kleinere afstanden verandert deze relatie, wat impliceert dat storingen mogelijk niet onafhankelijk zijn. Opvallend is de grote piek bij storingen op (vrijwel) dezelfde locatie. Naast mogelijke afhankelijk van storingen kan mogelijk ook sprake van fouten in de data (meerdere storingen op dezelfde locatie kan betekenen dat de locatie onbetrouwbaar is en bijvoorbeeld is afgerond). Voor de methodiek is de aanname gemaakt dat een leiding slechts één keer stoort en daarna wordt vervangen. Dit is alleen geldig voor korte leidinglengtes, in de methode zijn testen gedaan voor 10 en 30 meter. In het algemeen zal het bij toepassen van de methodiek belangrijk zijn om te toetsen dat storingsgegevens onafhankelijk zijn.

3.4.2 Lessen uit de toepassing bij Waterbedrijf Groningen

De volgende lessen zijn geleerd bij het toepassen van de methode op de data van Waterbedrijf Groningen (van Laarhoven, 2018):

- Een voordeel van deze aanpak is dat storingsfrequentie van een bepaalde leeftijdsgroep gebaseerd kan worden op recente storingsdata (plus LIS-data) zonder dat er verdere aannames nodig zijn over storingsen in voorgaande jaren die niet geregistreerd zijn (de methode is ongevoelig voor 'censoring van de data vanwege left truncation').
- Aanname 3 maakt het mogelijk om een dataset met storingsgedrag over een relevant leeftijdsbereik te verkrijgen. Voor het extrapoleren van de storingsdata is dit essentieel, want segmenten uit één aanlegjaar worden pas 10 jaar geobserveerd en het overgrote deel daarvan heeft nog niet gestoord ('right censoring van de data'). De geldigheid van aanname 3 is echter te betwijfelen (zie ook paragraaf 2.4.4).
- De data van een registratiejaar wordt nu vertaald naar storingsfrequenties aan de hand van de LIS-data van hetzelfde jaar. Op die manier wordt recht gedaan aan de jaarlijkse veranderingen die worden doorgevoerd in het net (zoals het vervangen van AC). In het LIS komen van jaar tot jaar echter ook mutaties voor vanwege het corrigeren van leidingeigenschappen (zoals het toevoegen van een paar kilometer 'ontdekte AC leidingen'). Dit soort mutaties zouden met terugwerkende kracht doorgevoerd moeten worden in de LIS-data die horen bij voorgaande registratiejaren om de storingsdata uit die registratiejaren correct te kunnen gebruiken.
- Een aantal van de meest gangbare statistische modellen (normaal, exponentieel, lognormaal, loglogistisch, Weibull) zijn volgens deze aanpak gefit op de data van Groningen. Daarbij bleek dat deze modellen ieder flexibel genoeg zijn om een fit van vergelijkbare kwaliteit te produceren (de fits hadden vergelijkbare R^2 waarden en QQ-plots¹). Dit betekent dat het leeftijdsinterval waarover de betrouwbaarheid van de berekende storingsfrequentie voldoende is (dankzij voldoende storingsdata en voldoende kilometers leidinglengte), te beperkt is om onderscheid te kunnen maken tussen de verschillende statistische modellen. Een keuze voor één specifiek statistisch model op basis van de data zelf is daarmee niet goed te onderbouwen.
- Uit aanname 4 volgt dat deze aanpak alleen de kans op storen m.b.t. de eerste storing in een segment beschrijft. Wanneer de lengteschaal van een segment overeenkomt met de lengteschaal van reparatie (1-10 meter) is dit geen probleem. Drinkwaterbedrijven zijn echter vooral ook geïnteresseerd in de storingsfrequentie van langere segmenten zoals specifieke leidingen (100-1000 meter). Deze worden meestal niet vervangen na de eerste storing. Statistiek voor statistisch repareerbare systemen zou kunnen worden gebruikt om de storingsfrequentie van een aantal kleine niet-repareerbare segmenten in één leiding te aggregeren naar de storingsfrequentie van de leiding. Uit de degradatiecurve van een repareerbare leiding zou vervolgens een kansverdeling voor einde levensduur kunnen worden afgeleid met behulp van numerieke simulaties in combinatie met een set formeel gedefinieerde vervangingscriteria voor de leiding op basis van storingsgeschiedenis.
- Een student bij Waterbedrijf Groningen heeft laten zien dat wanneer één flexibel model (Weibull) wordt toegepast op subgroepen van de storingsdata, verschillen in verouderingsgedrag tussen subgroepen gekwantificeerd kunnen worden. Deze aanpak helpt niet bij het kiezen van het beste statistische model voor extrapolatie, maar is zeer waardevol om cohortindelingen te vinden en onderbouwen (Hosenfeld, 2018).

1: Een QQ-plot of quantile-quantile plot is een plot waarbij twee verzamelingen met quantielen tegen elkaar worden uitgezet. Als de verzamelingen uit hetzelfde statistische model komen (bv. een normaalverdeling), dan zal deze plot een rechte lijn laten zien. Deze wiskundige toetst is een veel gebruikt visueel middel om te zien of een statistisch model goed is gekozen.

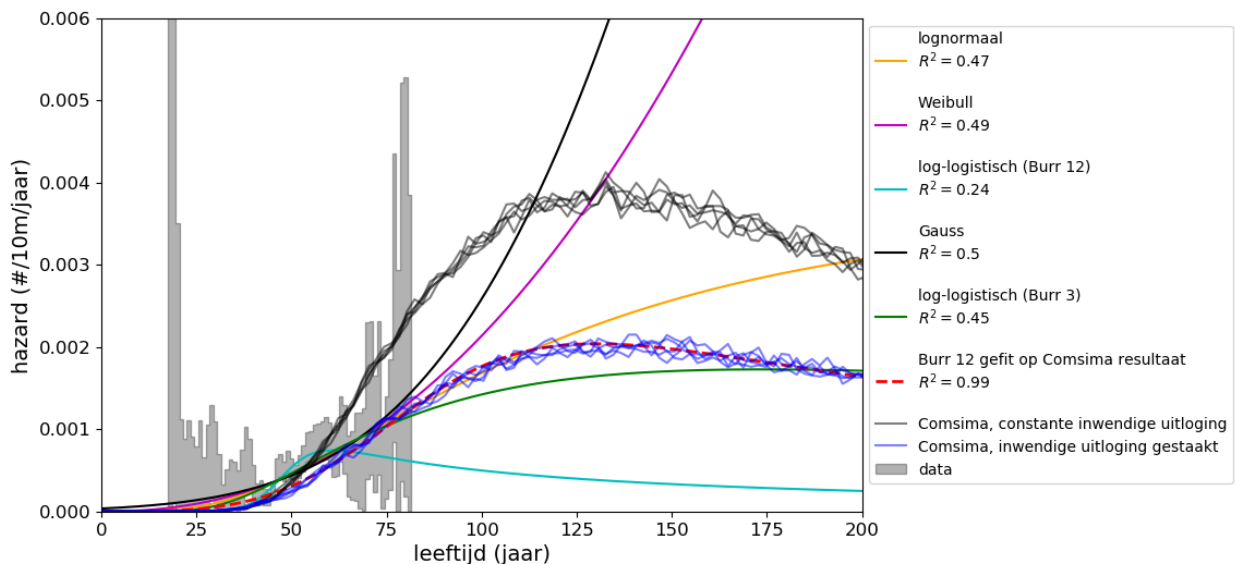


Figuur 3-7 Histogram van afstanden tussen paren van storingen (Derk Rouwhorst, WMD & Masja Brons, WLN).

3.4.3 Toepassing op de data van Brabant Water

In Figuur 3-8 is de fit methode zoals toegepast op de data van Waterbedrijf Groningen herhaald voor de dataset van Brabant Water (spontane storingen op buisdelen met een diameter van 100 mm). Ter vergelijking zijn ook de Comsima-resultaten voor deze dataset weergegeven, gebaseerd op de data uit exitbeoordelingen ter conditiebepaling (dus zonder opportunity bias voor storingen). Uit deze figuur moet vervolgens een model gekozen worden om het typische verouderingsgedrag van een buis mee te beschrijven (stap 3 in paragraaf 3.1).

Geen van de fits geeft een goede match met de storingsdata (de R^2 is altijd 0,5 of minder) en de onderlinge verschillen qua R^2 zijn minimaal (deze worden waarschijnlijk veroorzaakt door verschillen in de capaciteit van verdelingen om van vorm te veranderen).



Figuur 3-8. Vijf kansverdelingen die veel gebruikt worden om storingsgedrag te beschrijven, gefit op de storingsdata van Brabant Water. De R^2 van iedere fit staat vermeld in de legende. Ook zijn de Comsima-resultaten uit Figuur 2-5 weergegeven ter vergelijking. Deze zijn gebaseerd op de data uit exit beoordelingen ter conditiebepaling en komen overeen met de twee mogelijke uitersten wat betreft het gedrag van inwendige uitloging in verband met de drinkwatersamenstelling.

Qua vorm hebben de Comsima-resultaten het meest gemeen met de lognormale en log-logistische modellen, die ieder initieel met toenemende snelheid stijgen en daarna weer afvlakken. Met name het log-logistische model type 12 sluit aan op de vorm van de Comsima-uitkomsten, zoals blijkt uit een directe fit om de Comsima-resultaten van

die curve (rode stippellijn). De log-logistische verdelingen zijn echter ook het gevoeligst voor het gedeelte van de historische storingsdata met lage onzekerheden (de leeftijden van ongeveer 40 tot 70) en hun vorm wordt sterk door dat gedeelte van de data beïnvloed. Deze klasse van verdelingen heeft een extra parameter ten opzichte van de overige verdelingen. Dit maakt dat deze klasse van verdelingen de data makkelijker op deze manier zal overfitten. Dit is op te lossen met een groter bereik aan storingsdata met een lage onzekerheid, of gedeeltelijk op te lossen door geavanceerdere fitmethoden en extra aannamen te gebruiken om rekening te houden met de hoeveelheid leidingen die nog niet gestoord hebben (het gedeelte van de populatie dat onderhevig is aan 'left censoring').

Als een verdeling moet worden gekozen voor extrapolatie (stap 3 in de methodiek), heeft de eenvoudigere lognormale verdeling op basis van dit beeld daarom de voorkeur, waarbij de Weibull-fit en log-logistische fit van type 3 zouden kunnen worden gehanteerd als een onder- en bovengrens. Er blijven echter aanzienlijke verschillen aanwezig tussen het model en de op de data gefitte verdelingen.

4 Reflecties en aanbevelingen van internationale domeinexperts

Leading Edge conference for Sustainable Asset Management (LESAM)

Het paper in hoofdstuk 2 is gepresenteerd op LESAM. De reacties uit de zaal waren vooral gericht op de vraag hoe deze modelaanpak verder kan worden gevalideerd, zonder verdere suggesties.

Computing and Control for the Water Industry conference (CCWI)

Het paper in hoofdstuk 2 is gepresenteerd op het CCWI. De algemene indruk was dat op deze conferentie niet heel veel “computing and control” op het vlak van leidingmateriaaldegradatie of -vervangingsplanning werd gepresenteerd, behalve in de sessie waar ook dit verhaal is gepresenteerd. De relevantie van het werk werd herkend, juist ook voor AC als materiaal waarvoor dat op dit moment van belang is. De reacties uit de zaal waren vooral gericht op de vraag hoe deze modelaanpak verder kan worden gevalideerd. Hierbij werden geen suggesties gegeven, en de deelnemers van de sessie bleken ook geen data beschikbaar te hebben waarmee dat zou kunnen. Verder werd het belang van het scheiden van verschillende faalwijzen op verschillende onderdelen voor deze methode onderstreept.

Noorse Universiteit voor Natuurwetenschappen en Techniek (NTNU)

Het werk is besproken met dr. Marius Møller Rokstad en Professor Franz Tscheikner-Gratl, beide experts uit de onderzoeksgroep *Hydraulic and Environmental Engineering* aan de faculteit Civiele Techniek, en dr. Harald Rødseth, uit de onderzoeksgroep *Mechanical and Industrial Engineering* aan de faculteit werktuigbouwkunde van de NTNU. Qua algemene indruk geven zij aan vergelijkbare vraagstukken op vergelijkbare wijze te hebben aangepakt. Specifiek advies dat zij konden geven betrof:

- Er zijn enkele samengestelde degradatiecurves waar zij goede resultaten mee hebben behaald: De Hertz curve en ‘the Linear Extension of the Yule Process’. Beide zijn goed beschreven in de literatuur en zouden kunnen worden gebruikt voor storingsdata.
- De statistische technieken achter Bayesian inference zouden zeer geschikt zijn voor de doelen van Comsima. Dit zijn technieken waarmee op een goede manier inschattingen gemaakt kunnen worden van de verdelingen van invoerparameters, op basis van opeenvolgen expertkennis en praktijkdata; dit kan met name uitkomst bieden wanneer praktijkdata beperkt beschikbaar is. Daarnaast biedt dit een minder rekenintensieve optie om de verdelingen van invoerparameters te aggregeren naar een onzekerheid in het conditiegetal. Dit geeft de mogelijkheid om beperkingen te omzeilen met betrekking tot het aantal benodigde berekeningen om een betrouwbare inschatting van de storingskans te maken.
- Hoewel dit een goede aanpak is, blijft het belangrijk om in het achterhoofd te houden dat deze extrapolatie van storingsdata uiteindelijk gebaseerd is op verregaande vereenvoudigingen die met de huidige beschikbaarheid van data onvermijdelijk zijn. Het wordt daarom afgeraden om van één curve uit te gaan en om in plaats daarvan verdelingen die boven en onder de Comsima-uitkomsten vallen te hanteren als boven en ondergrens.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

In dit werk is gedemonstreerd hoe Comsima gebruikt kan worden om praktijkdata te vertalen naar het storingsgedrag van groepen leidingen. Dit is gedaan door – volgens de methodiek voorgesteld in van Vossen en van Laarhoven (2017) – verschillende bronnen van leiding en bodem data afkomstig van pilot gebieden van Brabant Water en PWN te combineren met belastings- en verouderingsmodellen en de daaruit volgende resultaten te vergelijken met historische storingsdata. Dit geeft een invulling aan het algemene concept van UKNOW (Moerman et al., 2015) om verschillende bronnen van kennis te combineren om te komen tot een betere inschatting van de storingskans van leidingen.

Een algemene bevinding van het onderzoek is het inzicht dat Comsima's inschatting van storingskans gevoelig is voor veel verschillende aspecten van de ingevoerde verdelingen voor modelparameterwaarden. Dit onderstreept het belang van het bepalen van deze verdelingen wanneer een dergelijke toepassing van Comsima wordt beoogd. Bevindingen rond specifieke modelparameters zijn:

- **Uitlogingsnelheid.** De verdeling van uitlogingsnelheden binnen een groep leidingen laat zich beschrijven door een Weibullverdeling, aangevuld met een extra fractie van buizen zonder uitlogging (Figuur 3-2). Het model is gevoelig voor de selectiebias die op kan treden wanneer data gebaseerd wordt op alleen gestoorde (relatief zwakke) of juist alleen ongestoorde leidingen (Figuur 2-3). Ook is er een significant verschil opgemerkt tussen de maximale uitlogingswaarden die worden gevonden door thymolftaleinetesten en georadarmetingen (Figuur 3-3, in overeenkomst met vergelijkbare conclusies in van Laarhoven en van Summeren, 2019). Dit betekent dat Comsima zal moeten worden afgestemd op de methode die ten grondslag ligt aan de invoer data.
- **Verschilzettingen.** De verdeling van snelheden waarmee verschilzettingen over leidingen zich ontwikkelen laat zich beschrijven door een exponentiele verdeling (Figuur 2-1). Er is nauwelijks verschil in snelheidsverdelingen gevonden voor zettingen over kleine afstanden (5,10,30 meter, Figuur 3-6). Het is niet duidelijk waarom dit geen verschil maakt. Vervolgens is gebleken dat het gesimuleerde storingsgedrag nagenoeg onveranderd blijft wanneer vergelijkbare zettingsverdelingen worden toegepast over verschillende afstanden (Figuur 3-2). Dit suggereert dat uitlogging het dominante mechanisme van veroudering is ten opzichte van zettingen binnen geteste omstandigheden. Dit hangt mogelijk samen met de minimale rol van verbindingen in het model zoals toegepast in dit onderzoek.
- **Wanddikte.** De verdeling van wanddikten binnen een groep leidingen met dezelfde diameter (maar met verschillende drukklassen) laat zich beschrijven door een normale verdeling (Figuur 2-1).
- **Druk.** De verdeling van drukken over verschillende deelgebieden (Figuur 3-4) laat zich slechts ruwweg beschrijven door een Weibull verdeling (Figuur 2-1).
- **Bezuikspanning.** Een halvering van de bezuikspanning in het model, zoals gesuggereerd in (Beuken en van Laarhoven, 2019) heeft weinig invloed op het gemodelleerde storingsgedrag (Figuur 3-5). Dit is ondanks het feit dat deze halvering per definitie leidt tot een verdubbeling van het door Comsima berekende conditiegetal voor individuele leidingen (waarbij een conditiegetal tussen 0 en 1 een voldoende conditie aangeeft).

De modelvoorspellingen komen qua orde van grootte en vorm goed genoeg overeen met de historische data om met vertrouwen een keuze voor extrapolatie te ondersteunen (Figuur 3-8). Desalniettemin blijft de extrapolatie van storingsdata gebaseerd op verre gaande vereenvoudigingen die met de huidige beschikbaarheid van data onvermijdelijk zijn (paragrafen 3.3.1 en 3.4.1). Voor een aantal aannames is laten zien dat de geldigheid beperkt is:

- **De aanname dat storingen onafhankelijk van elkaar zijn** (aanname 1 in paragraaf 3.4.1). Figuur 3-7 suggereert dat er correlatie is tussen nabijgelegen storingen. Eén mogelijke verklaring is dat de effecten van storingen en hun reparaties leiden tot extra storingen in de omgeving. Dubbelingen in de registratie zijn een andere verklaring. Het effect op de methode is dat – in de vergelijking tussen modelresultaat en historische data – de storingsfrequenties uit de historische data enigszins overschat worden.
- **De aanname dat de veroudering en het daaruit volgende storingsgedrag van buizen uit alle aanlegjaren met dezelfde kansverdeling kan worden beschreven** (aanname 3 in paragraaf 3.4.1). Figuur 2-4 laat zien dat er inderdaad een verschil in storingsgedrag is tussen oudere en jongere leidingen. Een verschil in kwaliteit door een veranderd productieproces is een mogelijke verklaring, hoewel Figuur 3-5 suggereert dat sterk afwijkende materiaalparameters maar een beperkt effect hebben op de ontwikkeling van storingsfrequentie door de tijd. Een verschil in zorgvuldigheid bij installatie in verschillende aanlegjaren is een andere mogelijke verklaring. Figuur 2-5 geeft een voorbeeld van hoe veranderende omstandigheden door de tijd – in dit geval veranderingen in drinkwatersamenstelling – ook een rol kunnen spelen. Het effect op de methode is een over- of onderschatting van de werkelijke storingsfrequenties door het model, zoals geïllustreerd in deze figuren.
- **De aanname van segmenten van een bepaalde lengte die slechts één keer storen** (aanname 4 in paragraaf 3.4.1 in combinatie met aanname 1 in paragraaf 3.3.1). Het opdelen van het te analyseren netwerk in eenmalig storende (en daarna vervangen) segmenten van een bepaalde lengte is essentieel voor het extrapoleren van historische data met een hazardcurve en voor het vergelijken van de data met de gesimuleerde hazard curve uit Comsima. Wanneer deze segmenten te groot worden gekozen, bevat de historische data mogelijk meerdere storingen per segment, wat leidt tot een overschatting van de storingsfrequenties uit de historische data. Verder leken de Comsima-simulaties in deze studie slechts beperkt gevoelig voor de segmentlengte, met onder- of overschattingen van het storingsgedrag in de vergelijking tot gevolg (Figuur 3-6). Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door aannames in de huidige verouderingsmodellen. Met het oog op zetting als verouderingsmechanisme zou de segmentlengte mogelijk meer effect hebben bij het gebruik van een model voor de rol van verbindingen en gedetailleerdere zettingsdata. Met oog op uitloging als verouderingsmechanisme zou de segmentlengte waarschijnlijk meer effect hebben wanneer niet uitgegaan wordt van homogene uitloging over de hele buis, maar van meer realistische inhomogene uitloging (van Laarhoven en van Summeren, 2019), waardoor de kans op een ‘zwakke schakel’ toeneemt met de segmentlengte.

De algemene vorm van de modelresultaten wijst op een toenemende storingsfrequentie met buisleeftijd tot leeftijden van ongeveer 100 jaar en daarna een afvlakking. Enerzijds kan dus gesteld worden dat een exponentieel toenemende storingsfrequentie met leeftijd (Gauss- of Weibullverdeling in figuur Figuur 3-8) minder geschikt is voor extrapolatie dan een afvallende verdeling (lognormaal of log-logistisch van type Bur 3). Anderzijds suggereert dit wel dat de stijging van de storingsfrequentie van de bestaande AC buizen nog enkele decennia zal aanhouden, zeker wat betreft het gros van de leidingen, dat nu een leeftijd van rond de 50 jaar heeft. Dit is een belangrijk gegeven, gezien de (ogenschijnlijk prevalerende) opvatting dat het AC netwerk de komende decennia zal moeten worden vernieuwd.

5.2 Aanbevelingen

Met oog op het modelleren van storingskans en de daaruit volgende toekomstige storingsfrequenties met Comsima wordt het volgende aanbevolen:

- Pas de Monte-Carlomodule van Comsima aan om op basis van praktijkdata gedefinieerde verdelingen voor modelparameterwaarden aan te nemen als invoer. Dit is essentieel voor een gefundeerde benadering van storingskans met Comsima. Daarbij moet in het bijzonder rekening gehouden worden met het definiëren van verdelingen voor parameters die duidelijk afhankelijk zijn van de waarde van andere parameters, zoals

wanddikte afhangt van diameter. In dergelijke gevallen moeten verdelingen opeenvolgend gebruikt worden, waarbij de verdeling van bijvoorbeeld wanddikte zal moeten afhangen van de getrokken diameter.

- Verzamel zoveel mogelijk praktijkwaarden van modelparameters in een programma van exitbeoordelingen of andere metingen. Dit is essentieel voor een zo goed mogelijk gefundeerde benadering van storingskans met Comsima en meer in algemene zin voor dit soort schattingen. Dit zal in het bijzonder van belang zijn voor buizen van andere materialen dan AC, waarvoor nog minder storingsdata beschikbaar is en waarvoor dus nog meer moet worden vertrouwd op het model. Meet daarbij niet alleen aan gestoorde buizen, om selectiebias te voorkomen.
- Onderzoek de meerwaarde van een eventuele uitbreiding van de Monte-Carlo module met een methode voor Bayesian inference, zoals aanbevolen door internationale domeinexperts. Dit zou een mogelijkheid kunnen bieden om beperkingen te omzeilen met betrekking tot de beperkte beschikbaarheid van praktijkdata en/of beperkingen rond het aantal benodigde berekeningen om een betrouwbare inschatting van de storingskans te maken.
- Verfijn het model achter de rol van verbindingen in Comsima. Dit is essentieel om het storingsgedrag van deze componenten te modelleren, maar ook om het effect van zettingen op het storingsgedrag van de buisdelen zo goed mogelijk te modelleren.
- Verfijn de verouderingsmodellen in Comsima. Deze zijn essentieel voor het voorspellen van toekomstige storingskans en frequentie. Nog niet alle relevante processen worden meegenomen in de verouderingsmodule van Comsima. De veroudering van PVC is onderwerp van onderzoek in het huidige BTO. Daarnaast bestaat het vermoeden dat in ieder geval dynamische belastingen, zoals drukvariaties, een belangrijke rol hebben op de veroudering en het storen van het materiaal.

Met oog op het voorspellen van toekomstige storingsfrequenties van groepen leidingen door middel van een met Comsima onderbouwde extrapolatie van historische storingsdata wordt het volgende aanbevolen:

- Doorloop de methode met meer pilots, met name gericht op andere leidingmaterialen (ten eerste het meest gebruikte materiaal, PVC). Op die manier wordt meer inzicht verkregen in de beschikbaarheid/toereikendheid van model-invoerdata, verouderingsmodellen en historische storingsdata. Besteed in die pilots ook aandacht aan de vertaling van een extrapolatie van de degradatiecurve naar een voorspelling van toekomstige storingskans in de groep (stap 4 in paragraaf 3.1, bijvoorbeeld volgens de methoden beschreven door Agudelo-Vera en Blokker, 2018). Op die manier wordt behalve de technische haalbaarheid van de methode ook de praktische meerwaarde hiervan duidelijker.
- Vanuit bovenstaande aanname wordt op dit moment nog niet aangeraden om een aparte applicatie voor geautomatiseerde extrapolatie van storingsgedrag voor dynamisch gedefinieerde groepen te maken. Focus in plaats daarvan op verdere ontwikkeling van het modelleren van toekomstige kans en frequentie met Comsima volgens de eerdere aanbevelingen. In de toekomst zou kunnen blijken dat integratie van de methode in Comsima de voorkeur heeft boven de ontwikkeling van een aparte tool. Het alvast automatiseren van een vergelijking tussen modeluitkomsten en een in te laden database met storingsdata kan meerwaarde hebben bij het verder valideren van het model.

Het modelleren van storingsfrequenties van individuele leidingen De komende jaren wordt steeds meer bekend over de conditie en ligging van individuele leidingen. Comsima kan ook worden gebruikt om in te schatten wanneer de conditie van individuele leidingen niet meer voldoet. Zodoende kan worden voortgebouwd op de methode beschreven in dit rapport om te komen tot een storingsvoorspelling voor individuele leidingen. Het is aan te bevelen om een visie op de aanpak van het voorspellen van toekomstige storingsfrequenties voor individuele leidingen te formuleren.

6 Referenties

- Agudelo-Vera, C.M., en Blokker, E.J.M., 2018, Vergelijken vervangingsstrategieën AC-leidingen, KWR, Nieuwegein, BTO 2018.047.
- Beuken, R., van Vossen, J., Trietsch, E., Jacobs, B., Geers, R., Horst, P., Louter, J., en Diemel, R., 2016, Comparing results of four decision support software tools on mains replacement, in: *Computation and Control for the Water Industry*, Amsterdam.
- Beuken, R. H. S., en Mesman, G. A. M., 2015, Actualisatie driehoeksverdelingen voor onderbouwing investeringsprognoses leidingen, KWR, Nieuwegein, BTO 2015.223(s), pp. 38.
- Beuken, R. H. S., en van Laarhoven, K. A., 2019, Sterkteonderzoek asbestcementbuizen, KWR, Nieuwegein, BTO 2019.008, pp. 64.
- Hosenfeld, B., 2018, Repareren of vervangen? Statistisch onderzoek naar de levensduur van waterleidingen, in: *NHL Hogeschool*, Groningen.
- Moerman, A., van Vossen, J., Beuken, R.H.S., 2016, UKNOW - Zicht op leidingdegradatie door samenhang in informatiesystemen, KWR, Nieuwegein, KWR2016.031
- van Laarhoven, K. A., 2018, Kansdichtheidsverdelingen met USTORE data voor storingen in Groningen en geheel Nederland, KWR, Nieuwegein, KWR 2018.026, pp. 26.
- van Laarhoven, K. A., en van Summeren, J. R. G., 2019, Röntgentomografie als meetmethode voor de toestand van asbestcementleidingen, KWR, Nieuwegein, BTO 2019.010, pp. 35.
- van Vossen, J., en van Laarhoven, K., 2017, Voorspellen storingsfrequenties: haalbaarheid en methodiek, KWR, Nieuwegein, BTO 2017.045, pp. 52.
- Wols, B. A., en Moerman, A., 2015, COMSIMA: model voor spanningen op ondergrondse leidingen, KWR, Nieuwegein, BTO 2015.206(s), pp. 37.
- Wols, B. A., en Moerman, A., 2017, Verouderingsmodule voor spanningsberekeningen in leidingen met Comsima, KWR, Nieuwegein, BTO 2017.074, pp. 37.
- Wols, B. A., van Summeren, J., Mesman, G. A., en Raterman, B., 2016, Fysieke kwetsbaarheid leidingnet voor klimaatverandering, KWR, Nieuwegein, BTO 2016.016, pp. 87.