

BTO 2017.074 | December 2017

BTO rapport

Verouderingsmodule
voor
spanningsberekeningen
in leidingen met
Comsima

BTO

Verouderingsmodule voor spanningsberekeningen in leidingen met Comsima

BTO 2017.074 | December 2017

Opdrachtnummer

400554-162

Projectmanager

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

Opdrachtgever

BTO - Thematisch onderzoek - Assetmanagement

Kwaliteitsborger(s)

dr. P. (Peter) van Thienen

Auteur(s)

dr. B.A. (Bas) Wols, ir. A. (Andreas) Moerman

Verzonden aan

Dit rapport is verzonden aan BTO participanten.

Een jaar na publicatie is het openbaar.

Jaar van publicatie
2017

Meer informatie

dr. ir. B.A. Wols
T +31 (0)30 60 69 604
E bas.wols@kwrwater.nl

Keywords

Comsima, spanningsberekeningen,
veroudering

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

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



Watercycle
Research
Institute

BTO 2017.074 | December 2017 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

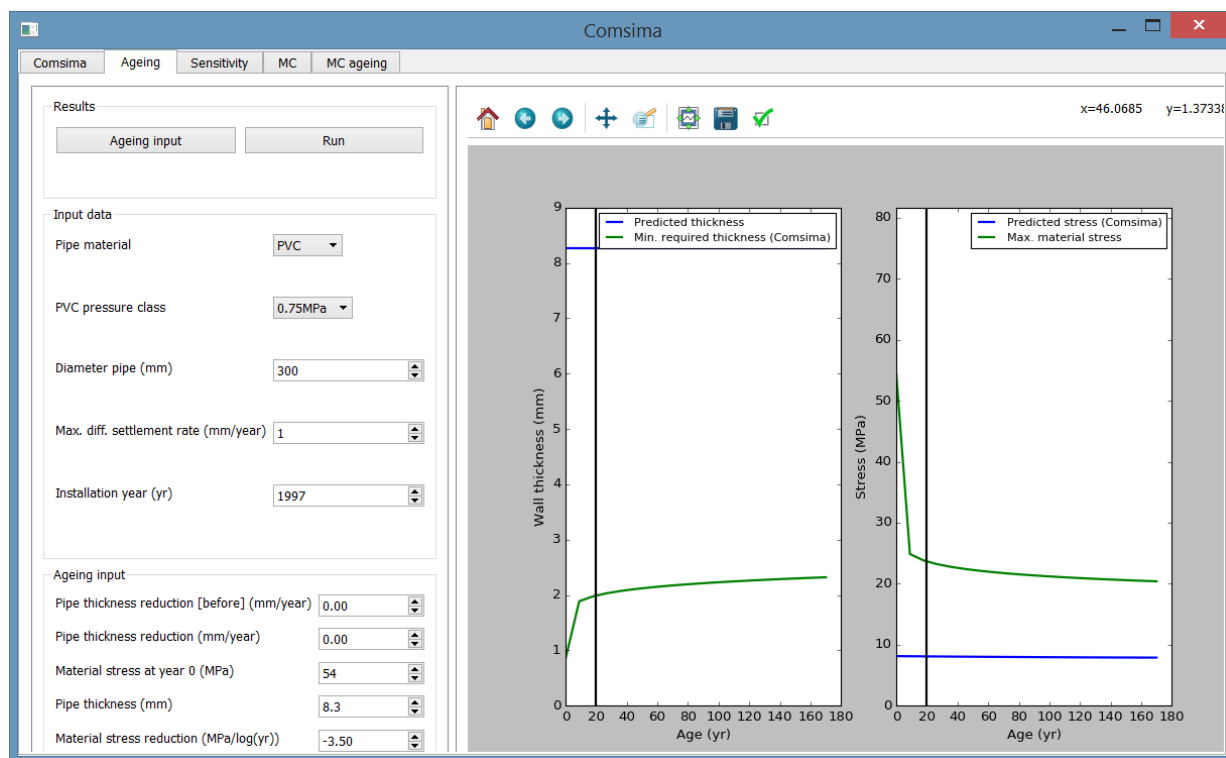
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

BTO Managementsamenvatting

Comsima met verouderingsmodule biedt handvat voor juiste prioritering vervanging leidingen

Auteur(s) dr. Bas Wols, ir. Andreas Moerman

Leidinggroepen met hogere spanningen en/of hoekverdraaiingen vertonen over het algemeen ook een hogere storingsfrequentie en geven dus meer storingen en meer overlast. Dit blijkt uit onderzoek met een nieuwe versie van het rekenmodel Comsima, waarbij een verouderingsmodule is toegevoegd. Comsima berekent voor onaantaste leidingen de spanningen als gevolg van diverse belastingen, zoals grondbelasting, verkeersbelasting, interne druk en zetting. Door toevoeging van de verouderingsmodule kan Comsima het effect van de leeftijd van leidingen op spanningen berekenen en bepalen wanneer specifieke leidingen naar verwachting zullen gaan bezwijken. Dit helpt waterbedrijven een vervangingsstrategie met de juiste prioritering op te stellen voor hun hele leidingnet. De resultaten uit Comsima met verouderingsmodule komen goed overeen met daadwerkelijke storingsgegevens voor een deelgebied van PWN. Van Comsima is een tool demo-versie van een tool gemaakt, waarmee de gebruiker berekeningen van spanningen en hoekverdraaiingen aan een enkele leiding kan uitvoeren.



Voorbeeldberekening van Comsima met veroudering voor een enkele leiding

Belang: verminderen overlast door kapotgaan van ondergrondse leidingen

In Nederland treden enkele keren per dag storingen op in waterleidingen. Dit leidt tot overlast voor de omgeving. Kapotte leidingen ontstaan doordat ze te zwaar worden belast. Door verouderingsprocessen worden leidingen na verloop van tijd minder bestendig tegen belasting. Om storingen te voorkomen, moeten leidingen tijdig worden vervangen. Voor het opstellen van een doeltreffende vervangingsstrategie is een goed beeld nodig van de optredende belastingen en de verouderingsprocessen..

Aanpak: veroudering toegevoegd aan Comsima en resultaten vergeleken met daadwerkelijke storingen

In dit onderzoek hebben we Comsima gebruikt om een beter beeld te krijgen van spanningen die een leiding in zijn levensduur krijgt te verwerken en in hoeverre deze toelaatbaar zijn. Daartoe is een verouderingsmodule aan het rekenmodel toegevoegd, dat op basis van optredende belastingen de spanningen en hoekverdraaiingen in een leiding berekent. Voor de verouderingsmodule is gebruik gemaakt van gegevens van het KSLB (KennisSysteem LevensduurBepaling). Bestaande kennisregels zijn gebruikt voor AC, gietijzeren en PVC leidingen.

De spanningsberekeningen met Comsima zijn voor een deelgebied van PWN vergeleken met daadwerkelijke storingen. Voor de berekeningen is informatie uit verschillende gegevensbronnen

gecombineerd, zoals satellietgegevens voor zettingen, grondsoortenkaart, grondwaterstanden, verkeerskaart en hydraulische modellen voor interne druk.

Resultaten: grote spanningen en verdraaiingen in Comsima komen overeen met veel storingen

Leidinggroepen met hogere spanningen en/of hoekverdraaiingen vertonen over het algemeen ook een hogere storingsfrequentie. Dit verband is sterker voor AC leidingen dan voor PVC leidingen. Dat blijkt uit de vergelijking van spanningsberekeningen met Comsima voor een deelgebied van PWN.

Implementatie: juiste prioritering voor vervangen van leidingen

Waterbedrijven kunnen resultaten van Comsima meewegen om met de juiste prioritering een vervangingsstrategie voor hun hele leidingnet op te stellen. Daarnaast kunnen zij een demo-versie van de tool zelf gebruiken om spanningen en hoekverdraaiingen te berekenen. Hiermee kunnen zij de spanningen inschatten in een bepaald leidingtype en de invloed van diverse invoerparameters op de spanning.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in rapport *Verouderingsmodule voor spanningsberekeningen in Comsima* (BTO 2017.074).

Inhoud

Inhoud	1
1 Inleiding	2
1.1 Comsima	2
1.2 Doel	2
1.3 Leeswijzer	2
2 Verouderingsmodule	3
2.1 Inleiding	3
2.2 Veroudering in Comsima	3
2.3 Afname wanddikte	4
2.4 Afname toelaatbare spanningen	5
2.5 Toenemende belastingen door zettingen	6
2.6 Beschikbare materialen	6
2.7 Monte-Carlo-analyse	6
3 Resultaten verouderingsmodule	7
3.1 Inleiding	7
3.2 Voorbeeldresultaat voor AC leiding	7
3.3 Voorbeeldresultaat voor GGJ-leiding	9
3.4 Voorbeeldresultaat voor PVC-leiding	11
4 Beschrijving tool	13
4.1 Inleiding	13
4.2 Comsima berekening (zonder veroudering)	13
4.3 Verouderingsmodule	14
4.4 Gevoeligheid	16
4.5 Monte-Carlo-analyse zonder veroudering	16
4.6 Monte-Carlo-analyse met veroudering	17
5 Vergelijking Comsimaberekening met storingsgegevens	19
5.1 Inleiding	19
5.2 Gegevens	19
5.3 Resultaten berekeningen Comsima en vergelijking met storingen	22
5.4 Voorbeeld berekening over 50 jaar	26
6 Conclusies en aanbevelingen	28
6.1 Conclusies	28
6.2 Aanbevelingen	28
Referenties	31

1 Inleiding

1.1 Comsima

Comsima is een model om de spanningen in ondergrondse waterleidingen te berekenen als gevolg van verschillende belastingen op de leiding, zoals zettingen, interne druk, verkeer, grondbelasting, etc. (Wols et al. 2015). Bij zettingen treden naast spanningen in de leiding ook hoekverdraaiingen op; deze berekent Comsima eveneens. Door de berekende spanningen en hoekverdraaiingen te vergelijken met toelaatbare spanningen en hoekverdraaiingen, kan ingeschat worden of een leiding gaat bezwijken of niet. Met Comsima kan een heel leidingnetwerk snel¹ doorgerekend worden (van Daal en Wols, 2012), waarbij een beeld ontstaat van de zwakke punten in het leidingnet. Deze informatie kunnen waterbedrijven gebruiken om de juiste prioritering te maken voor de vervanging van leidingen.

Comsima is in eerste instantie ontwikkeld voor niet-aangetaste leidingen. Dit leidt echter tot een overschatting van de berekende sterkte, omdat leidingen die langer in de grond liggen aangetast kunnen zijn als gevolg van interacties met (drink)water of met de bodem, of het materiaal zelf kan verouderen. Het gevolg hiervan is dat hogere spanningen optreden in de leiding en/of dat de leiding minder vermogen hebben om deze spanningen op te kunnen nemen.

1.2 Doel

Het doel van het onderzoek is om een verouderingsmodule toe te voegen aan Comsima op basis van bestaande kennisregels. Met de toevoeging van de veroudering wordt ook het tijdsaspect meegenomen in Comsima, zodat de toename van spanningen of faalkansen over de tijd gevolgd kan worden. Hiermee kan een inschatting gemaakt worden op welk moment de spanningen in een leiding te hoog worden. De resultaten van Comsima in combinatie met de verouderingsmodule worden vergeleken met storingen voor een deelgebied van PWN.

Een demonstratieversie van een tool is gemaakt waarin de berekeningen van Comsima met verouderingsmodule voor een enkele leiding uitgevoerd kunnen worden. Hiermee kunnen waterbedrijven een inschatting maken van de spanningen in een bepaald type leiding.

1.3 Leeswijzer

De theoretische basis achter de verouderingsmodule is beschreven in Hoofdstuk 2, gevolgd door de resultaten van Comsima in combinatie met de verouderingsmodule in Hoofdstuk 3. De werking van de tool wordt uitgelegd in Hoofdstuk 4. Een voorbeeldberekening voor een leidingnet waarin de modelresultaten worden vergeleken met storingen is beschreven in Hoofdstuk 5.

¹ Snelheid is afhankelijk van de grootte van het gebied en of er wel of geen Monte Carlo analyse wordt uitgevoerd. Voor een gebied met bijvoorbeeld 300 000 leidingsegmenten gaat het om orde van grootte van een aantal uren.

2 Verouderingsmodule

2.1 Inleiding

Als een leiding voor een langere tijd onder de grond ligt, kan een aantal effecten optreden:

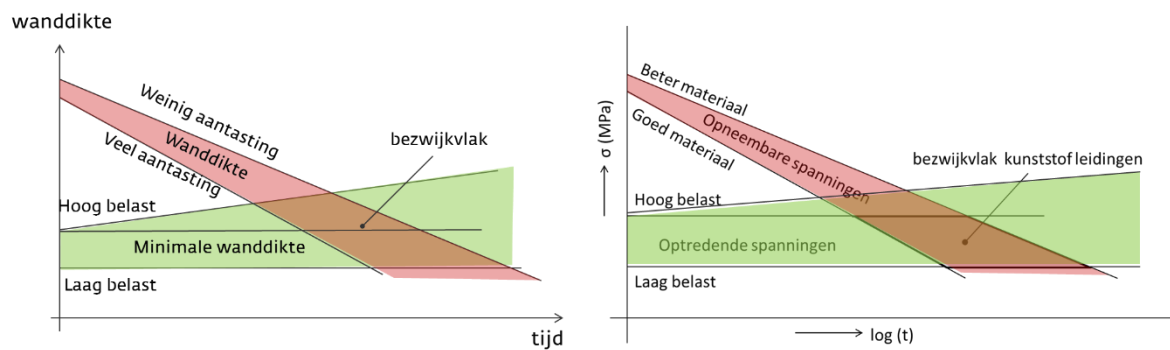
- afname van de wanddikte, veroorzaakt door interne/externe uitloging (bij asbest-cement (AC) leidingen) of corrosie (bij grijs gietijzeren (GGIJ) leidingen);
- afname van de toelaatbare spanning, veroorzaakt door weerstand tegen langzame scheurvorming (bij polyvinylchloride (PVC) leidingen);
- toenemende belastingen door zettingen. Dit is strikt genomen geen veroudering van de leiding, maar veroorzaakt een toename van de spanning in de tijd.

Dit zijn complexe processen, die onder meer afhankelijk zijn van de bodemsamenstelling, grondwatersamenstelling en -stand, kwaliteit van het leidingwater en kwaliteit van het leidingmateriaal. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van reeds bestaande kennisregels m.b.t. veroudering; dit is het KSLB voor AC, GGIJ en PVC (Beuken en Mesman, 2011). Naast regels die rekening houden met de afname in sterkte, staan in het KSLB ook regels als gevolg van verschillen in belasting. Deze regels zijn niet gebruikt, omdat Comsima al voorziet in berekening van de belastingen.

2.2 Veroudering in Comsima

De verouderingsmodule berekent de afname van de effectieve wanddikte over de tijd en/of de afname van de toelaatbare spanning over de tijd. De afname van effectieve wanddikte zal niet uniform zijn over de leiding, maar kan lokaal sterk verschillen. Zeker voor GGIJ kan corrosie zeer lokaal optreden. Voor de sterkteberekeningen is uitgegaan van een conservatieve inschatting van de afname van de effectieve wanddikte (Beuken en Mesman, 2011).

In Comsima worden aan de hand van de belastingen de spanningen in de leiding berekend. Bij een afnemende wanddikte zal de spanning toenemen. Door Comsima te combineren met de verouderingsmodule kan bepaald worden of de spanning kritisch wordt of niet. Omgekeerd kan Comsima ook berekenen wat de minimale benodigde wanddikte is en kan deze getoetst worden met de berekende wanddikte van de verouderingsmodule. In Figuur 2-1 (links) is geïllustreerd hoe de wanddikte over de tijd kan afnemen als gevolg van veroudering, terwijl de minimale vereiste wanddikte toeneemt in de tijd als gevolg van toename in belasting (bijvoorbeeld zetting). Falen treedt op als het "groene vlak" boven het "rode vlak" uitkomt. Van deze afname kan sprake zijn bij AC- en GGIJ-leidingen; bij PVC zal de wanddikte gelijk blijven. Rechts staan de gevolgen voor de spanningen: de optredende spanningen nemen toe als gevolg van toename in belastingen (groene vlak), terwijl de opneembare spanningen van het materiaal afnemen in de tijd. Dit is het geval voor PVC waar de opneembare spanning lineair afneemt met de logaritme van de tijd. Voor AC en GGIJ zal de opneembare spanning gelijk blijven.



FIGUUR 2-1 VEROUDERING ALS AFNAME VAN WANDDIKTE OVER DE TIJD (RODE VLAK) VOOR AC EN GGIJ (LINKS) EN ALS AFNAME VAN OPNEEMBARE SPANNING (RODE VLAK) OVER DE TIJD VOOR PVC (RECHTS). TOENEMENDE BELASTINGEN ZORGEN VOOR EEN TOENAME IN BENODIGDE WANDDIKTE (GROENE VLAK, LINKS) EN OPTREDENDE SPANNINGEN (GROENE VLAK, RECHTS). DE VLAKKEN REPRESENTEREN DE VARIATIES DIE KUNNEN OPTREDEN IN AFNAME IN WANDDIKTE EN SPANNINGEN EN DE VARIATIE IN DE BELASTINGEN.

2.3 Afname wanddikte

Voor AC en GGIJ neemt de wanddikte af als gevolg van inwendige en uitwendige uitloging (AC) of corrosie (GGIJ). Voor AC-leidingen hangt dit af van de volgende factoren:

- SI van (drink)water (inwendige uitloging);
- wel/geen uitwendige coating (uitwendige uitloging);
- (te kort aan) kalk in de bodem (uitwendige uitloging).

Voor AC zijn de volgende regels gebruikt (Beuken en Mesman, 2011):

- $SI > 0$, afname wanddikte = 0 mm/jaar;
- $-0,2 < SI < 0$, afname wanddikte = 0,05 mm/jaar;
- $-0,8 < SI < -0,2$, afname wanddikte = 0,1 mm/jaar;
- $SI < -0,8$, afname wanddikte = 0,2 mm/jaar.

Als er geen uitwendige coating aanwezig is, kan de wanddikte ook nog afnemen als gevolg van uitwendige uitloging afhankelijk van het kalkgehalte in de bodem (Beuken en Mesman, 2011):

- $CaCO_3 > 1\%$ (kalkrijk), afname wanddikte = 0,0 mm/jaar;
- $0,5\% < CaCO_3 < 1\%$ (kalkarm), afname wanddikte = 0,05 mm/jaar;
- $CaCO_3 < 0,5\%$ (kalkloos), afname wanddikte = 0,1 mm/jaar.

Voor GGIJ-leidingen hangt de afname van de wanddikte af van de volgende factoren:

- CI van (drink)water (inwendige corrosie)²;
- wel/geen inwendige coating (inwendige corrosie);
- wel/geen uitwendige coating (uitwendige corrosie);
- grondsoort (uitwendige corrosie);
- grondwaterstand (uitwendige corrosie).

² In de toekomst zal de CI verdwijnen (update Mededeling 100) en zal er een alternatief gevonden moeten worden hiervoor.

Voor GGIJ wordt een score toegekend, afhankelijk van de omstandigheden. Met behulp van deze score wordt de afname in wanddikte (t_{rate} in mm/jaar) berekend volgens:

$$t_{rate} = \frac{10}{(50 + 200 \frac{score}{score_{max}})}$$

De maximale score is 70 (in het KSLB wordt ook met belastingen gewerkt, en is de maximale score 100). Voor bepaling van de score zijn de regels gebruikt volgens Tabel 2-1. Hoe hoger de score, hoe kleiner de corrosie is.

TABEL 2-1 OVERZICHT VAN SCORES VOOR AFNAME WANDDIKTE VAN GGIJ-LEIDINGEN (BEUKEN EN MESMAN, 2011). H_{PIPE} IS DE AFSTAND VAN HET MAAVELD TOT DE BOVENKANT VAN DE LEIDING.

	Scores	Scores
CI	Wel inwendige coating	Geen inwendige coating
CI < 0.5	40	40
0.5 ≤ CI < 1	35	30
1 ≤ CI < 1.5	30	20
1.5 ≤ CI < 2.0	25	10
CI ≥ 2.0	20	0
Bodemsoort	Wel uitwendige coating	Geen uitwendige coating
Zand	15	15
Leem	12	10
Klei	9	5
Veen	6	0
Leiding in grondwater		
Nee ($H_{pipe} < H_w - 0.25[m]$)	15	15
Wisselend ($H_w - 0.25[m] < H_{pipe} < H_w + 0.25[m]$)	10	5
Ja ($H_{pipe} > H_w + 0.25[m]$)	5	0

Voor de scores met betrekking tot de grondwaterstand wordt met een buffer gewerkt van 0,25 m. Als de leiding binnen de grondwaterstand plus of min deze buffer ligt, wordt er van uitgegaan dat de leiding wisselend wel/niet in het grondwater staat.

2.4 Afname toelaatbare spanningen

Bij PVC leidingen neemt de toelaatbare spanning af als gevolg van de weerstand tegen langzame scheurvorming. Als gevolg daarvan kan een bepaalde spanning in de leiding slechts gedurende een bepaalde tijd opgenomen worden. Als het maar lang genoeg duurt, kan een spanning tot bezwijken leiden (merk op dat dit zeer lange tijden zijn bij lage belastingen). In het KSLB wordt een levensduur (LD) voorspeld volgens de volgende formule:

$$LD = score * (LD_{max} - LD_{min}) + LD_{min}$$

waarbij LD_{max} =300 jaar en LD_{min} =35 jaar. De score is het product van individuele scores (tussen 0 en 1) voor verschillende factoren. Dit zijn voornamelijk belastingsfactoren, die niet meegenomen worden in de verouderingsmodule (die zitten al in de belastingen voor de mechanische berekeningen Comsima, de resultaten van Comsima zijn niet direct vergelijkbaar met die van het KSLB, omdat in Comsima meer belastingen zitten) en een factor op basis van het aanlegjaar. De score is 0,9 bij een aanlegjaar <1970, 0,5 bij een aanlegjaar tussen 1970 en 1980, en 1,0 bij een aanlegjaar > 1980. In de verouderingsmodule wordt de levensduur teruggerekend naar een afname in toelaatbare

spanning. Als gevolg van weerstand tegen langzame scheurvorming is de afname in toelaatbare spanning gelijk aan:

$$\sigma_f = \sigma_{fb} + \sigma_{fa} \log(t)$$

Waarin σ_f de toelaatbare spanning gedurende een bepaalde tijdsduur t is, σ_{fb} is de initiële toelaatbare spanning en σ_{fa} de afname in toelaatbare spanning. De mate waarin deze afneemt kan verschillen; hiervoor zijn echter geen eenduidige gegevens beschikbaar zodat gewerkt wordt met de waarde uit het KSLB van $\sigma_{fa} = -3.5 \text{ MPa}/\log(s)$. Voor de toelaatbare spanning die zeer kort mag optreden ($t=1s$) wordt gewerkt met een waarde van 54.45 MPa. Deze waarden voor σ_{fb} en σ_{fa} volgen uit de ontwerpnormen voor PVC (met een afname van $3.5 \text{ MPa}/\log(s)$) loopt deze lijn door de ontwerpnorm van 42 MPa op 1 uur en 35 MPa op 100 uur). De initiële toelaatbare spanning wordt vervolgens aangepast aan de hand van de berekende levensduur volgens het KSLB:

$$\sigma_{fb} = 54.45 + (\log(LD_{max}) - \log(LD))\sigma_{fa}$$

2.5 Toenemende belastingen door zettingen

De meeste belastingen zullen niet veranderen over de levensduur. Echter, dit geldt niet voor zettingen. Deze zullen over het algemeen toenemen over de levensduur van de leiding. In Comsima kan de grootte van de verschilzetting opgegeven worden. Dit is ten opzichte van eerdere versies uitgebreid met een verschilzettingssnelheid. Aan de hand van de leeftijd van de leiding en de verschilzettingssnelheid wordt de verschilzetting berekend. De afstand waarover de verschilzetting plaatsvindt blijft gelijk. Met behulp van satellietgegevens kan bijvoorbeeld de zettingssnelheid (in mm/jaar) van een gebied gemeten worden. De gemeten zettingssnelheid wordt vervolgens geprojecteerd op de leiding en omgezet naar een verschilzettingssnelheid (zie Hoofdstuk 5). De aanname hierbij is dat de zettingssnelheid lineair blijft verlopen, wat overeenkomt met de theorie van Koppejan (na een korte exponentiele fase verloopt de zetting lineair met de tijd, Koppejan, 1948) die vaak gebruikt wordt voor zettingsberekeningen.

2.6 Beschikbare materialen

De gebruikte kennisregels in de verouderingsmodule zijn geschikt voor AC, GGJ en PVC. Voor staal zal de veroudering te veel afhankelijk zijn van lokaal toegepaste beschermingsmaatregelen, zodat er geen generieke kennisregels opgesteld kunnen worden. Voor PE kunnen net als voor PVC de toelaatbare spanningen over de tijd afnemen; de verwachting is echter dat dit veel minder is dan bij PVC. Er zijn echter te weinig gegevens beschikbaar om kennisregels voor PE op te stellen.

2.7 Monte-Carlo-analyse

Met behulp van een Monte-Carlo-analyse kan de onzekerheid of variatie van de verschillende parameters in het model meegenomen worden, zodat een onzekerheidsband op de berekende spanning bepaald wordt. Hetzelfde gebeurt voor de berekende hoekverdraaiing. Hiermee kan een faalkans berekend worden. Dit gebeurt door het aantal Monte-Carlo-iteraties waarop de toelaatbare spanning of hoekverdraaiing overschreden wordt op te tellen en te delen door het totaal aantal iteraties. Deze faalkans over de leeftijd is gelijk aan de cumulatieve verdelingsfunctie (CDF). Met behulp van de CDF kan de kansverdelingsfunctie (PDF) berekend worden. Vervolgens is de hazard functie (h) of faalfrequentie over de leeftijd bepaald, volgens $h = \text{PDF}/(1 - \text{CDF})$. Voor de Monte-Carlo-analyse is het van belang om een goed beeld te hebben van de onzekerheid op de verschillende invoerparameters (zie 4.5 en 4.6).

3 Resultaten verouderingsmodule

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zijn voorbeeldberekeningen voor AC, GGJ en PVC weergegeven van de verouderingsmodule. De volgende gegevens zijn gebruikt voor de leidingen:

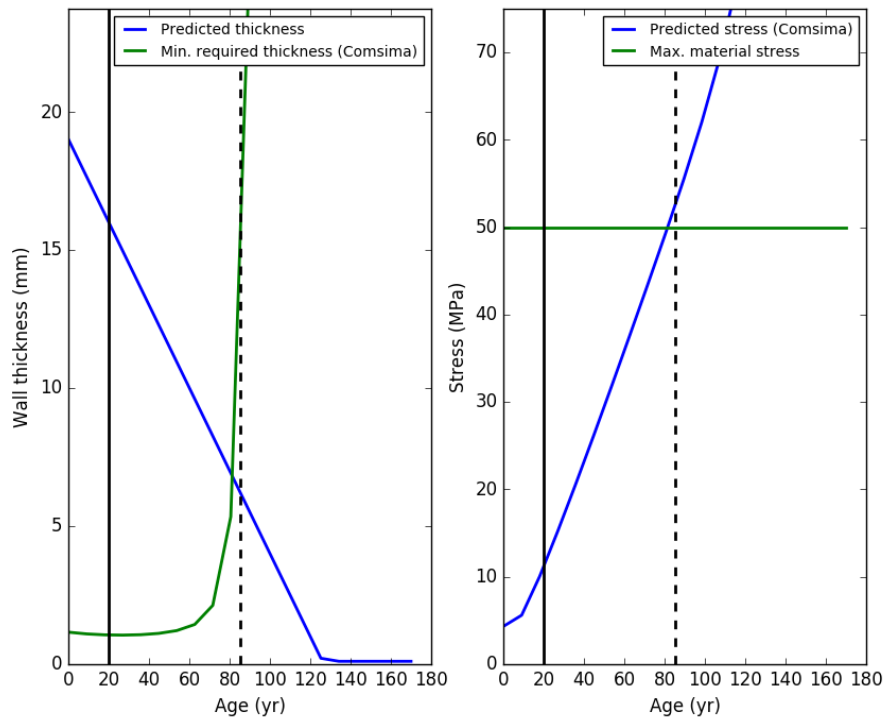
- diameter: 300 mm;
- interne druk= 3,5 bar;
- zetting is 5 mm/jaar over een afstand van 6,25 m;
- zandgrond;
- geen verkeersbelasting.

Omdat in de voorbeeldberekeningen is uitgegaan van zandgronden, nemen de spanningen als gevolg van zettingen wel sterk toe voor AC en GGJ leidingen, omdat een zandbodem sterker is en de leiding daarmee een grotere vervorming ondergaat (bij slappere bodems zal de leiding de grondvervorming ten dele volgen).

In de voorbeeldberekeningen wordt de afname van de wanddikte weergegeven over de tijd tezamen met de minimale benodigde wanddikte. Tevens wordt de verwachte spanning in de leiding over de tijd uitgezet tezamen met de toelaatbare materiaalspanning. Daarnaast worden de resultaten van de MC-analyse getoond.

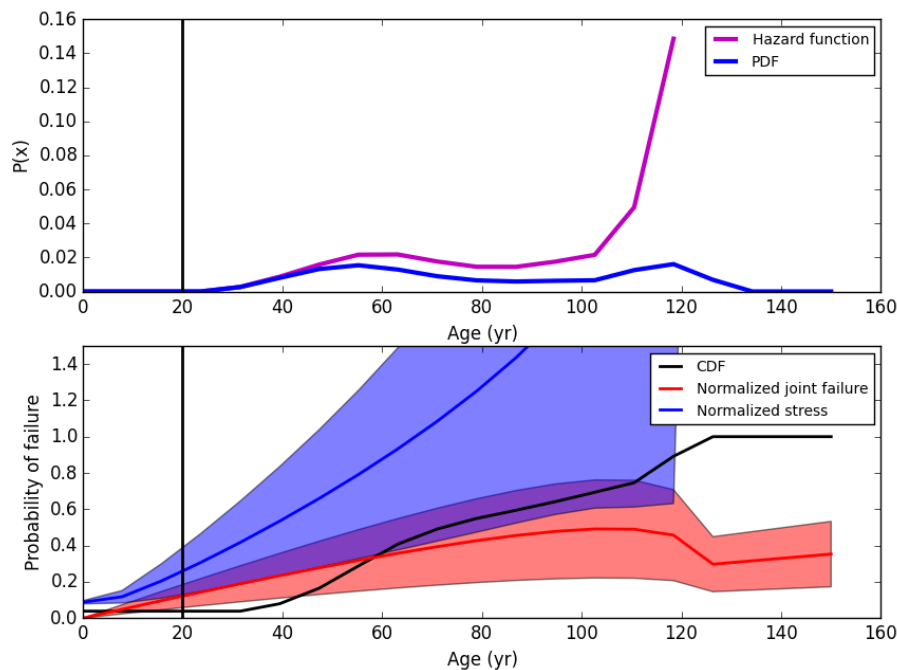
3.2 Voorbeeldresultaat voor AC leiding

De verouderingsmodule berekent de afname van de wanddikte voor een AC-leiding (Figuur 3-1). In dit voorbeeld is gewerkt met een SI van 0 en een calciumcarbonaat-percentages in de grond van 0,3, wat resulteert in een afname van de wanddikte van 0,15 mm/jaar (worst-case). Met Comsima is berekend wat de minimum benodigde wanddikte is om de belastingen te kunnen weerstaan. De maximum spanning die het materiaal kan opnemen is gelijk gesteld aan 50 MPa; deze verandert voor AC niet over de leeftijd. De spanning in de leiding neemt toe vanwege de afname in wanddikte en toename van de belasting door zetting. Comsima berekent ook de minimaal benodigde wanddikte om de belastingen te dragen. Omdat de belastingen vanwege de zettingen toenemen in de tijd, zal de minimum benodigde wanddikte eveneens toenemen in de tijd (de plotselinge toename is te verklaren vanwege het feit dat bij een te grote zetting een toenemende wanddikte slechts een lichte verlaging geeft van de optredende spanning).



FIGUUR 3-1 VOORBEELDBEREKENING VOOR AC-LEIDING: AFNAME VAN WANDDIKTE EN TOENAME VAN MINIMAAL BENODIGDE WANDDIKTE (MIN. REQUIRED THICKNESS) OM BELASTINGEN TE DRAGEN (LINKS), MAXIMUM MATERIAALSPANNING (MAX. MATERIAL STRESS) EN VOORSPELDE SPANNING (RECHTS). DE ZWARTE LIJN GEEFT DE LEEFTIJD VAN DE LEIDING WEER EN DE ZWARTE GESTREEPTE LIJN DE LEEFTIJD WAAROP DE TOELAATBARE SPANNING WORDT OVERSCHREDEN.

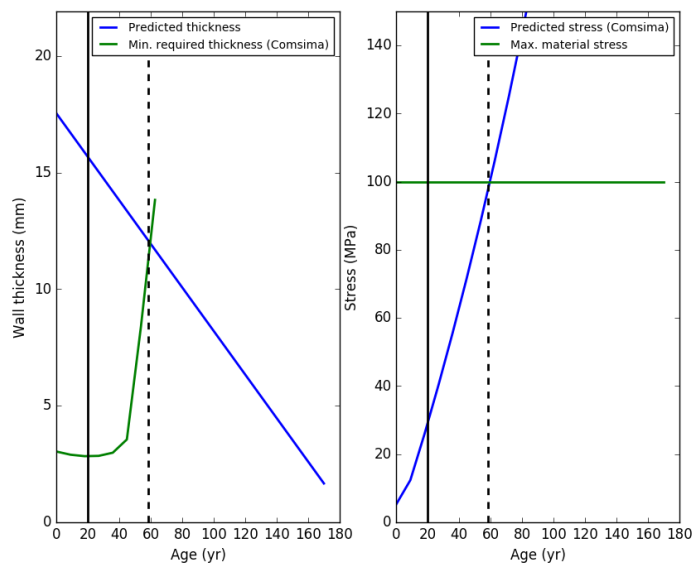
Daarnaast is een Monte-Carlo(MC)-analyse uitgevoerd, waarbij een onzekerheidsmarge (zie 4.5 en 4.6) op alle parameters van het model is gezet (Figuur 3-2). Hiermee kan de kans op falen berekend worden over de leeftijd van een leiding. De leiding faalt als of de berekende spanning groter wordt dan de maximum materiaalspanning of als de hoekverdraaiing groter wordt dan de toelaatbare hoekverdraaiing. Het aantal iteraties waarop falen voorkomt bepaalt de cumulatieve kansdichtheidsfunctie. Gemiddeld genomen zal na ongeveer 80 jaar de helft van dit soort leidingen zijn bezweken (het punt waarop de zwarte lijn – de cumulatieve kansdichtheidsfunctie (CDF) – 50% is).



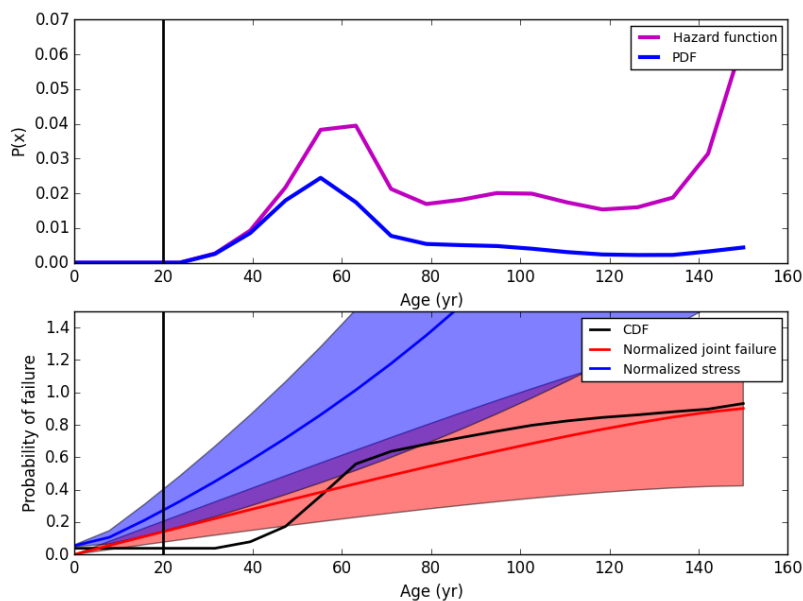
FIGUUR 3-2 VOORBEELDBEREKENING MC-ANALYSE VOOR EEN AC-LEIDING. (BOVEN) KANSDICHTHEIDFUNCTIE (PDF) EN FAALFREQUENTIE (HAZARD FUNCTION) OVER DE LEEFTIJD VAN DE LEIDING, (ONDER) BEREKENDE SPANNING GENORMALIZEERD NAAR MAXIMALE MATERIAALSPANNING (BLAUW), BEREKENDE HOEKVERDRAAIING GENORMALIZEERD NAAR TOELAATBARE HOEKVERDRAAIING (ROOD), CUMULATIEVE KANSDICHTHEIDSFUNCTIE (CDF) OVER DE LEEFTIJD. DE BANDBREEDTE GEEFT EENMAAL DE STANDAARDDEVIATIE WEER VAN DE BEREKENDE UITKOMSTEN VOOR ALLE MC-ITERATIES. FAALMECHANISME BETREFT ZOWEL HOEKVERDRAAIING ALS OVERSCHRIJDEN SPANNING.

3.3 Voorbeeldresultaat voor GGJ-leiding

Voor GGJ is een CI gebruikt van 2,5. De diepteligging van de leiding is 1 m, met een grondwaterstand op 1,2 m onder het maaiveld. Dit resulteert in een afname van de wanddikte van 0,09 mm/jaar. Net zoals bij AC neemt de minimum benodigde wanddikte toe over de tijd (Figuur 3-3). Hier valt echter op dat in de eerste jaren de minimum benodigde wanddikte wat afneemt; dit geeft een wat vertekend beeld: omdat een dunnere buis flexibeler wordt kan deze een grotere zetting aan. De spanning bij de voorspelde afgenomen wanddikte neemt echter wel toe als de zetting over de tijd toeneemt (Figuur 3-3, rechts). Gemiddeld genomen zal 50% van deze leidingen na ongeveer 60 jaar bezwijken, zie Figuur 3-4 (het punt waarop de zwarte lijn – de cumulatieve kansdichtheidsfunctie (CDF) – 50% is).



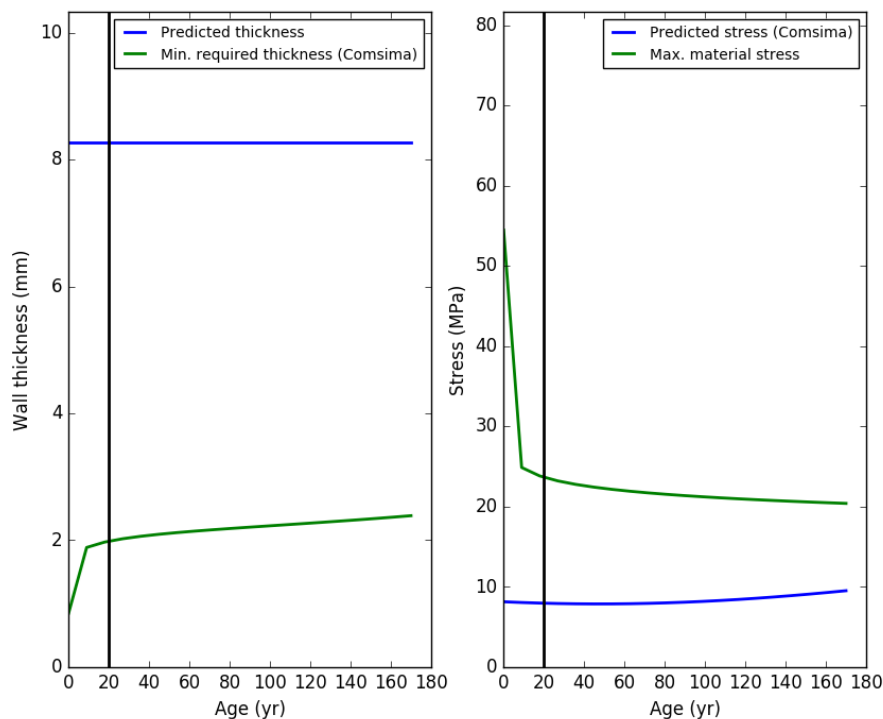
FIGUUR 3-3 VOORBEELDBEREKENING VOOR GGJ LEIDING: AFNAME VAN WANDDIKTE EN TOENAME VAN MINIMAAL BENODIGDE WANDDIKTE (MIN. REQUIRED THICKNESS) OM BELASTINGEN TE DRAGEN (LINKS), MAXIMUM MATERIAALSPANNING (MAX. MATERIAL STRESS) EN VOORSPELDE SPANNING (RECHTS). DE ZWARTE LIJN GEEFT DE LEEFTIJD VAN DE LEIDING WEER EN DE ZWARTE GESTREEPTE LIJN DE LEEFTIJD WAAROP DE TOELAATBARE SPANNING WORDT OVERSCHREDEN.



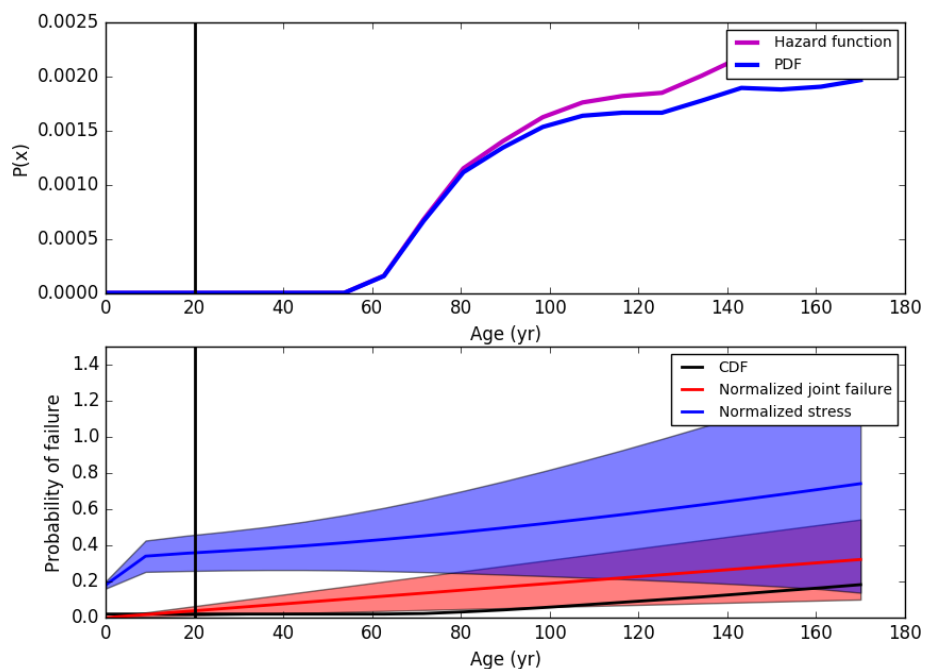
FIGUUR 3-4 VOORBEELDBEREKENING MC-ANALYSE VOOR GGJ-LEIDINGEN. (BOVEN) KANSDICHTHEIDFUNCTIE (PDF) EN FAALFREQUENTIE (HAZARD FUNCTION) OVER DE LEEFTIJD VAN DE LEIDING, (ONDER) BEREKENDE SPANNING GENORMALIZEERD NAAR MAXIMALE MATERIAALSPANNING (BLAUW), BEREKENDE HOEKVERDRAAIING GENORMALIZEERD NAAR TOELAATBARE HOEKVERDRAAIING (ROOD), CUMULATIEVE KANSDICHTHEIDSFUNCTIE (CDF) OVER DE LEEFTIJD.GENORMALIZEERD NAAR TOELAATBARE HOEKVERDRAAIING (ROOD), FAALKANS ALS FUNCTIE VAN DE LEEFTIJD. FAALMECHANISME BETREFT ZOWEL HOEKVERDRAAIING ALS OVERSCHRIJDEN SPANNING.

3.4 Voorbeeldresultaat voor PVC-leiding

Bij PVC-leidingen blijft de wanddikte gelijk (Figuur 3-5), maar neemt de maximum toelaatbare materiaalspanning af als gevolg van weerstand tegen langzame scheurvorming. Hierdoor neemt de minimum benodigde wanddikte eveneens toe. De berekende spanning neemt als gevolg van de toename van zetting wel langzaam toe. De kans op bezwijken blijft over de hele leeftijd klein voor deze leiding (Figuur 3-6), omdat de toelaatbare spanning hoog blijft (>20 MPa) uitgaande van de log-lineaire regels van de weerstand tegen langzame scheurvorming die volgens de norm lopen. In de praktijk blijkt dat er veel variatie zit in de toelaatbare spanning over de tijd.



FIGUUR 3-5 VOORBEELDBEREKENING VOOR PVC-LEIDING: AFNAME VAN WANDDIKTE EN TOENAME VAN MINIMAAL BENODIGDE WANDDIKTE (MIN. REQUIRED THICKNESS) OM BELASTINGEN TE DRAGEN (LINKS), MAXIMUM MATERIAALSPANNING (MAX. MATERIAL STRESS) EN VOORSPELDE SPANNING (RECHTS). DE ZWARTE LIJN GEEFT DE LEEFTIJD VAN DE LEIDING WEER EN DE ZWARTE GESTREEPTE LIJN DE LEEFTIJD WAAROP DE TOELAATBARE SPANNING WORDT Overschreden.



FIGUUR 3-6 VOORBEELDBEREKENING MC-ANALYSE VOOR PVC-LEIDING. (BOVEN) KANSDICHTHEIDFUNCTIE (PDF) EN FAALFREQUENTIE (HAZARD FUNCTION) OVER DE LEEFTIJD VAN DE LEIDING, (ONDER) BEREKENDE SPANNING GENORMALIZEERD NAAR MAXIMALE MATERIAALSPANNING (BLAUW), BEREKENDE HOEKVERDRAAIING GENORMALIZEERD NAAR TOELAATBARE HOEKVERDRAAIING (ROOD), CUMULATIEVE KANSDICHTHEIDSFUNCTIE (CDF) OVER DE LEEFTIJD. GENORMALIZEERD NAAR TOELAATBARE HOEKVERDRAAIING (ROOD), FAALKANS ALS FUNCTIE VAN DE LEEFTIJD. FAALMECHANISME BETREFT ZOWEL HOEKVERDRAAIING ALS Overschrijden SPANNING.

4 Beschrijving tool

4.1 Inleiding

Er is een tool gemaakt om Comsima in combinatie met de verouderingsmodule beschikbaar te maken voor gebruikers. In dit project is een eerste demo-versie van de tool gemaakt. De tool bestaat uit vijf tabbladen waarin diverse berekeningen uitgevoerd kunnen worden:

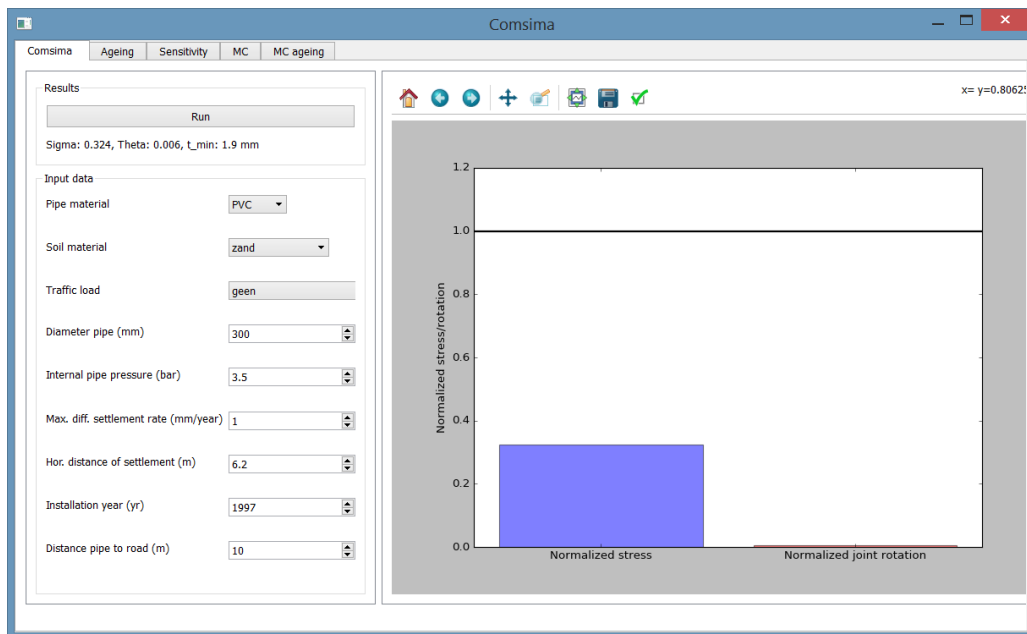
1. Comsima-berekening (zonder veroudering);
2. verouderingsmodule;
3. gevoeligheidsanalyse;
4. Monte-Carlo-analyse (zonder veroudering);
5. Monte-Carlo-analyse (met veroudering).

4.2 Comsima berekening (zonder veroudering)

In het eerste tabblad (Figuur 4-1) kan de spanning en hoekverdraaiing berekend worden met Comsima. Hierin is geen veroudering meegenomen. De volgende parameters kunnen opgegeven worden:

- leidingmateriaal ('pipe material'), keuzemenu met 10 leidingmaterialen, standaard is PVC;
- bodemtype ('soil material'), keuzemenu met 8 bodemtypes, standaard is zand;
- verkeersbelasting ('traffic load'): het type weg dat boven de leiding ligt. Standaard is er geen weg boven de leiding. Als een type weg gekozen wordt is het van belang om de afstand van de leiding tot de weg ook aan te passen;
- diameter leiding ('diameter pipe'), standaard staat deze op 300 mm;
- interne waterdruk ('internal pipe pressure'), standaard staat deze op 3,5 bar;
- verschilzetting per jaar ('Max. diff. Settlement rate'). De totale verschilzetting is de leeftijd van de leiding maal de verschilzetting per jaar. Standaardwaarde is 1 mm/jaar;
- horizontale afstand waarover de verschil zetting plaatsvindt ('Hor. Distance of settlement'): standaardwaarde is 6,2 m;
- installatiejaar ('Installation year'), standaard is 1997;
- afstand van de leiding tot de weg ('Distance pipe to road'); hoe dichterbij de weg hoe groter het effect van de verkeersbelasting. Standaardwaarde is 10 m, dan is er geen effect meer van de verkeersbelasting.

Door te klikken op run wordt de spanning en hoekverdraaiing berekend. Dit is ten opzichte van de toelaatbare spanning en hoekverdraaiing van het leidingmateriaal. Bij waarden groter dan 1 is de verwachting dat falen kan optreden vanwege overschrijden van de toelaatbare spanning en/of hoekverdraaiing.



FIGUUR 4-1 EERSTE TABBLAD, COMSIMABEREKENING ZONDER VEROUDERING

4.3 Verouderingsmodule

In dit tabblad is de verouderingsmodule werkzaam (Figuur 4-2). De opgegeven parameters in tabblad 1 blijven hier geldig (tenzij andere waarden opgegeven in dit tabblad). De volgende gegevens kunnen ingevoerd worden ('Input data'):

- leidingmateriaal ('pipe material'), keuzemenu met 10 leidingmaterialen, standaard is PVC. Let op, veroudering wordt alleen meegenomen voor de materialen PVC, AC, GGIJ;
- diameter leiding ('diameter pipe'), standaard staat deze op 300 mm;
- verschilzetting per jaar ('Max. diff. Settlement rate'). De totale verschilzetting is de leeftijd van de leiding maal de verschilzetting per jaar. Standaardwaarde is 1 mm/jaar.

Daarnaast kunnen afhankelijk van het gekozen materiaal diverse invoergegevens opgegeven worden:

- voor PVC is dit:
 - drukklasse van het PVC;
- voor AC:
 - SI water
 - SI water voor een bepaald jaartal in het geval de waterkwaliteit over de tijd veranderd is³;
 - jaartal waarin de waterkwaliteit veranderd is;
 - hoeveelheid kalk in de bodem ('lime soil');
- voor GGIJ:
 - CI water;

³ Op deze manier kunnen twee waarden van de SI over de tijd opgegeven worden. Een tabel met verloop van de SI per jaar kan nog niet ingevoerd worden.

- CI water voor een bepaald jaartal in het geval de waterkwaliteit over de tijd veranderd is;
- jaartal waarin de waterkwaliteit veranderd is;
- grondwaterstand ten opzichte van het maaiveld;
- diepteligging van de leiding ten opzichte van het maaiveld.

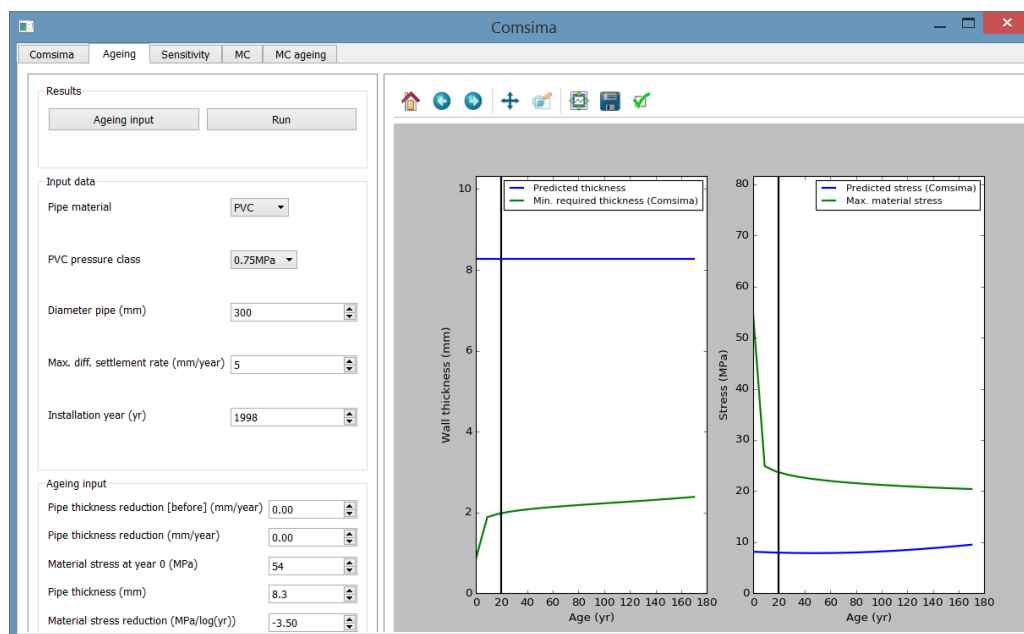
Op basis van de invoer wordt een afname in wanddikte (voor AC en GGJ) en/of afname in toelaatbare spanning berekend. De gebruiker kan deze ook direct opgeven door te klikken op de knop 'Ageing input'. De volgende parameters kunnen dan aangepast worden:

- afname wanddikte per jaar voor het opgegeven jaartal waarin de waterkwaliteit is veranderd;
- afname wanddikte per jaar na het opgegeven jaartal waarin de waterkwaliteit is veranderd;
- toelaatbare materiaalspanning op het jaar van aanleg;
- wanddikte in het jaar van aanleg;
- logaritmische afname in materiaalspanning per jaar; een negatief getal staat voor een afname.

Deze waarden worden automatisch aangepast als er een ander materiaal of andere eigenschappen van de leiding/bodem wordt gekozen.

Nadat er op run wordt gedrukt, worden er twee grafieken getoond:

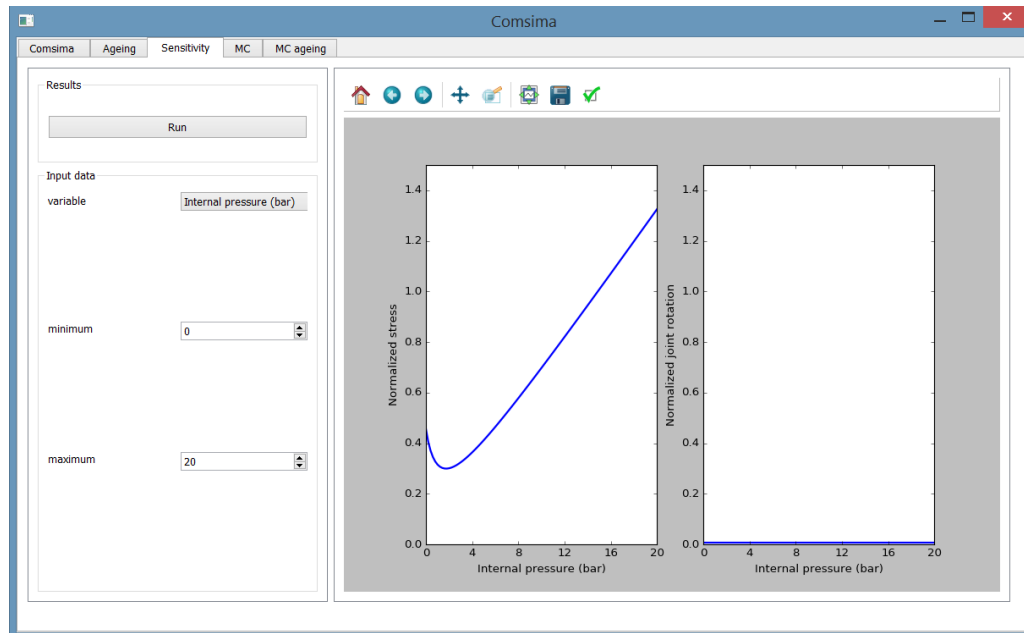
1. afname van de wanddikte over de leeftijd en de minimum vereiste wanddikte over de leeftijd. De zwarte verticale lijn geeft de actuele leeftijd weer en de stippellijn de verwachte leeftijd waarop falen kan optreden;
2. afname van de toelaatbare spanning over de leeftijd en de berekende spanning over de leeftijd.



FIGUUR 4-2 TWEEDE TABBLAD, COMSIMABEREKENING MET VEROUDERING

4.4 Gevoeligheid

In dit tabblad kunnen gevoeligheidsanalyses uitgevoerd worden. Een te variëren variabele kan opgegeven worden met een minimum en maximum waarde. Vervolgens berekent het model de spanning en hoekverdraaiing (beide genormaliseerd naar de toelaatbare waarde) als functie van de opgegeven variabele. De overige parameters zijn gelijk aan de waarden zoals opgegeven in tabblad 1 (Comsima).



FIGUUR 4-3 DERDE TABBLAD, GEVOELIGHEIDSANALYSE.

4.5 Monte-Carlo-analyse zonder veroudering

In het vierde tabblad (Figuur 4-4) kan een Monte-Carlo-analyse uitgevoerd worden. Als input kan het aantal iteraties van de MC-analyse opgegeven worden ('nRep') en daarnaast van iedere variabele in het model de onzekerheid. De onzekerheid wordt opgegeven door middel van de variatiecoëfficiënt (als percentage), namelijk de grootte van de standaarddeviatie ten opzichte van de gemiddelde waarde. In Vrouwenfelder en Siemes (1987) worden voor diverse grootheden variatiecoëfficiënten van onder meer 4% en 8% gegeven. Gezien de grotere onzekerheid onder de grond is voor de meeste parameters hier een waarde van 10% ingevuld; dat betekent dat de standaarddeviatie op de parameter 10% van het gemiddelde is. Dit is een eerste inschatting, een nadere onderbouwing van de variatiecoëfficiënten is echter nodig.

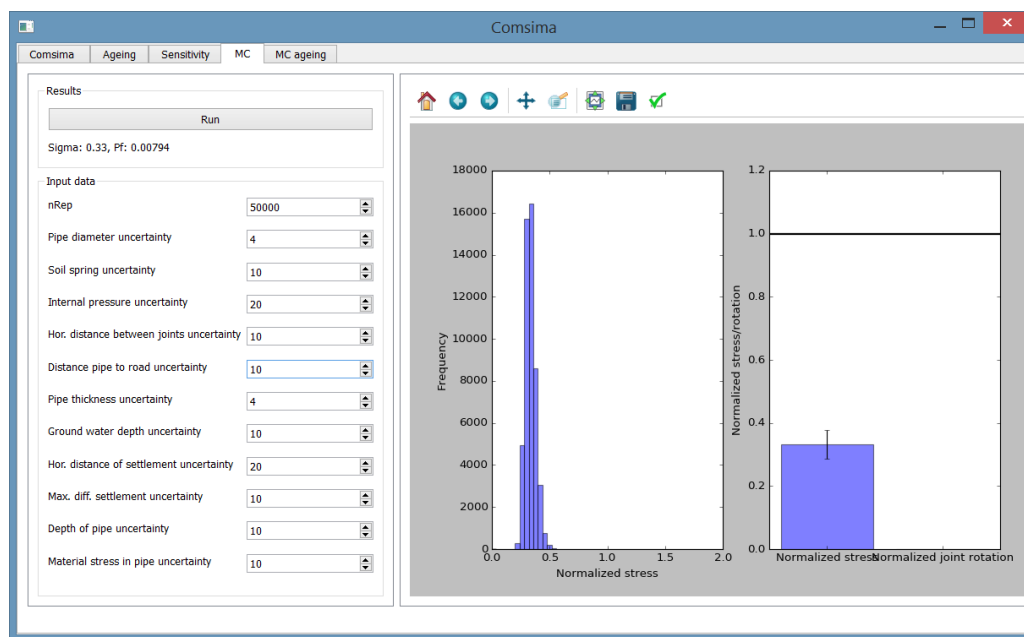
Voor de volgende parameters kan een onzekerheid worden opgegeven:

- diameter leiding (Pipe diameter);
- verschilzetting (Max. diff. Settlement);
- veerconstante grond (soil spring);
- interne druk (internal pressure);
- afstand tussen verbindingen (distance between joints);
- afstand leiding tot een weg (distance pipe to road);
- wanddikte leiding (pipe thickness);
- diepte van grondwaterstand (ground water depth);

- horizontale afstand waarover verschilzetting plaatsvindt (Hor. distance of settlement);
- afname in wanddikte van de leiding (Pipe thickness reduction);
- diepteligging van de leiding (depth of pipe);
- toelaatbare materiaalspanning (Material stress).

Na uitvoering van de Monte-Carlo-analyse wordt een grafiek getoond met de kansdichtheidsverdeling van de spanning voor elke iteratie. En daarnaast de verwachte spanning en hoekverdraaiing (genormaliseerd ten opzichte van de toelaatbare waarden) met de onzekerheidsbanden volgend uit de MC-analyse. Hiermee kan ook de kans op falen berekend worden, welke linksboven is weergegeven met de P_f .

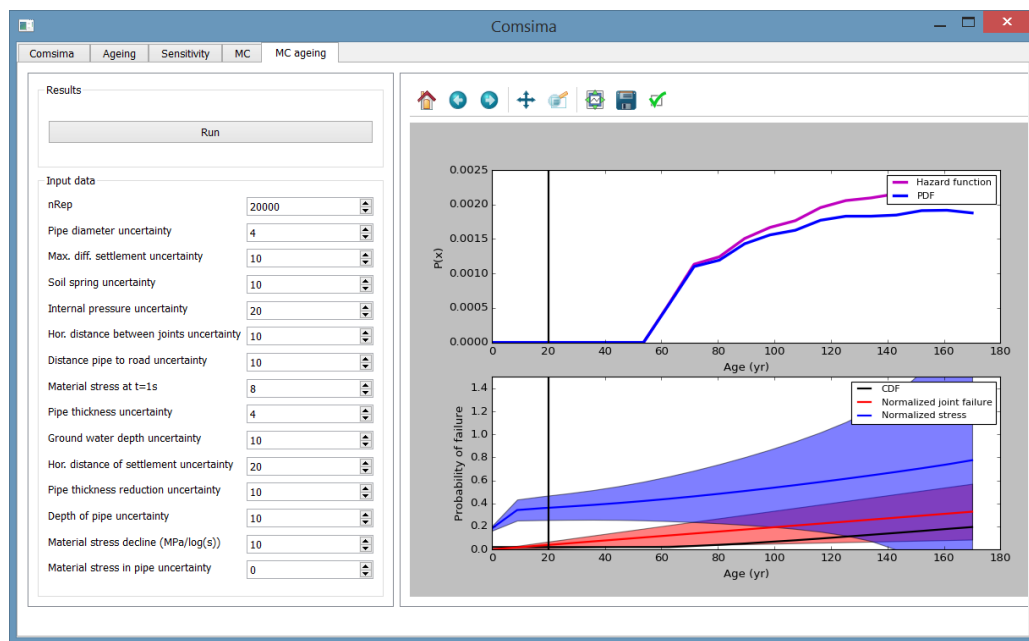
De berekening kan lang duren als er veel iteraties opgegeven worden.



FIGUUR 4-4 VIERDE TABBLAD, COMSIMABEREKENING MET MONTE-CARLO-ANALYSE (ZONDER VEROUDERING).

4.6 Monte-Carlo-analyse met veroudering

In het laatste tabblad (Figuur 4-5) kan een Monte-Carlo-analyse met het verouderingsmodel uitgevoerd worden. De invulvelden zijn gelijk aan die van het vorige tabblad, aangevuld met een invulveld over de onzekerheid van de afname van de wanddikte, en de initiële toelaatbare materiaalspanning en afname van de toelaatbare materiaalspanning (relevant voor PVC). De MC-analyse wordt nu uitgevoerd over een leeftijdsperiode van 150 jaar. Dit geeft per jaar de verdeling van de berekende spanningen en hoekverdraaiingen. Het aantal keer dat de toelaatbare materiaalspanning of hoekverdraaiing wordt overschreden geeft voor ieder jaar de faalkans. Deze faalkans over de leeftijd is de cumulatieve verdelingsfunctie (CDF). Met behulp van de CDF kan de kansverdelingsfunctie berekend worden. Vervolgens is de hazard functie of faalfrequentie over de leeftijd bepaald (zie 2.7).



FIGUUR 4-5 VIJFDE TABBLAD, COMSIMABEREKENING MET MONTE-CARLO-ANALYSE (MET VEROUDERING).

5 Vergelijking Comsimaberekening met storingsgegevens

5.1 Inleiding

Een voorbeeldberekening is uitgevoerd voor een deel van het PWN-gebied. Voor dit gebied heeft PWN satellietgegevens van SkyGeo aangekocht en is in een project samen met KWR Comsima zonder veroudering toegepast op het PWN-gebied (Moerman, 2017). In dit hoofdstuk zal hetzelfde gebied gebruikt worden voor een berekening met de verouderingsmodule in Comsima. Dit kan worden beschouwd als een beperkte validatie (ongeveer 1200 storingen) van het model. Een vergelijking met storingen lijkt de beste manier om het model te valideren, omdat directe metingen van spanningen aan buizen tijdrovend en duur zijn. Bovendien is voor de toepassing van Comsima het van groot belang dat de berekende spanningen overeenkomen met het optreden van storingen. Naarmate een groter gebied gekozen wordt, zal de validatie nauwkeuriger kunnen verlopen, omdat er meer storingen beschikbaar zijn. In een vorig onderzoek (Wols et al., 2015) is een validatie met Comsima zonder veroudering toegepast op een kleiner gebied (~100 storingen). In de huidige validatie is het ook mogelijk om onderscheid te maken tussen leidingmaterialen.

5.2 Gegevens

De volgende gegevens zijn gebruikt voor de berekening:

- leidinggegevens (aangeleverd in shapefile format op basis van leidinginformatiesysteem van PWN):
 - materiaal, bij PVC ook de drukklasse;
 - diameter;
 - wanddikte;
 - aanlegjaar
 - interne druk; (door PWN berekende maximale druk op gemiddelde dag, op basis van hydraulisch model (Synergie));
 - coating inwendig, indien niet bekend wordt aangenomen dat er geen coating aanwezig is;
 - coating uitwendig, indien niet bekend wordt aangenomen dat er geen coating aanwezig is;
 - status (in bedrijf/uit bedrijf);
 - datum van laatste statuswijziging;
- satellietgegevens van SkyGeo;
- drinkwaterkwaliteitsgegevens:
 - SI drinkwater (gebruik makend van REWAB data voor de periode 2000-2016 voor de pompstations van PWN);
 - CI drinkwater (gebruik makend van REWAB data voor de periode 2000-2016 voor de pompstations van PWN);
- omgevingsgegevens:
 - grondsoorten op basis van de Grondsoortenkaart 2006 (Alterra, 2006b);
 - kalkgehalte van de bodem op basis van de Alterra Bodemkaart (Alterra, 2006a);
 - grondwaterstanden op basis van de Alterra Bodemkaart (Alterra, 2006a);
 - posities van wegen en wegvakken middels de wegvakken uit de TOP10NL (Kadaster, 2016).

Voor de koppeling van de omgevingsgegevens wordt verwezen naar eerdere rapporten die verschenen zijn over Comsima (van Daal en Wols, 2012; Wols et al. (2015); Wols en Moerman (2015b)).

Voor de CI en SI van het drinkwater zijn de REWAB-gegevens van de pompstations gekoppeld aan leidingen. Bij de overgang tussen pompstations is een pendelzone aangehouden van 5 km rond de grenzen (zie Figuur 5-1). In deze pendelzones zijn de gemiddelde waarden van beide pompstations genomen voor de CI en SI.



FIGUUR 5-1 GEBIEDEN VAN PWN VERDEELD NAAR POMPSTATION. IN ORANJE STAAN DE PENDELZONES AANGEGEVEN.

Voor de aanwezigheid van coatings is gebruik gemaakt van de gegevens in het LIS. Over het algemeen geldt voor het PWN gebied dat AC-leidingen geen inwendige en uitwendige coating hebben, GGIJ leidingen in beperkte mate een inwendige coating (cementliner) hebben. NGIJ-leidingen hebben altijd een inwendige coating (cementliner).

Voor het kalkgehalte wordt in de bodemkaart van Alterra een driedelige codering gebruikt (in het veld KALK, de Vries et al. 2003): kalkarm (C), kalkrijk (A) en kalkloos (geen waarde). Dit komt overeen met een soortgelijke klasse-indeling als in het KSLB (Bodemkaart van Nederland, 1964):

- kalkrijk: $>1-2\% \text{ CaCO}_3$
- kalkarm : $0,5\% < \text{CaCO}_3 < 1-2\%$
- kalkloos $<0,5\% \text{ CaCO}_3$

Voor de bepaling van de druk is gebruik gemaakt van het hydraulisch pakket Synergiee(gegevens aangeleverd door PWN). De maximale druk op een gemiddelde dag is hiervoor gebruikt. Indien geen druk berekend is voor een leiding, wordt een schatting gemaakt. Om tot een zo goed mogelijke schatting van deze druk te komen is voor elke leiding (zonder gegeven druk) de druk in de meest nabije in gebruik zijnde leidingen bepaald. Op basis van gelijke diameter (marge $\pm 10\%$) en gelijk type leidingnet (distributie/transport) is een druk toegekend. Wanneer geen diameter binnen een marge van

$\pm 10\%$ in de directe omgeving (straal < 5 m) gevonden werd is een gemiddelde druk van 350 kPa toegekend.

Uit de satellietgegevens wordt de zetting in mm/jaar op vaste punten op het maaiveld gemeten (Tabak en Maljaars, 2017). Vervolgens worden deze punten geprojecteerd op de leidingen en wordt de maximale verschilzetting in een leiding bepaald. Hiervoor wordt de leiding opgeknipt in segmenten met lengte L . Alle zettingspunten die binnen een bufferafstand B van dit segment liggen, worden meegenomen en een gewogen gemiddelde (op basis van de afstand tussen het zettingspunt en het midden van de leiding) van deze zettingspunten wordt bepaald (Tabak en Maljaars, 2017). Vervolgens wordt de maximale zetting van alle segmenten in een leiding gebruikt voor de berekening van Comsim op de desbetreffende leiding. Hierbij wordt aangenomen dat er ook delen in de leiding zonder zetting zijn; hiermee is dit een worstcasescenario voor zetting. De afstand waarover de verschilzetting plaatsvindt is gelijk aan de segmentlengte L . Voor de segmentlengte wordt $L=5$ m gebruikt en voor de bufferafstand $B=10$ m. Meer details zijn beschreven in Moerman (2017).

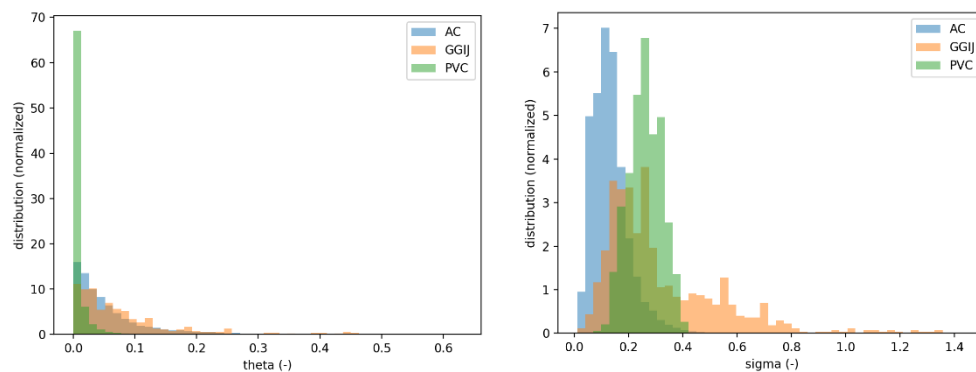
5.2.1 Storingsgegevens

PWN registreert sinds 2009 storingen van leidingen in USTORE. Voor dit onderzoek zijn op 23 augustus 2017 storingsgegevens van PWN aan de USTORE database onttrokken en geschikt gemaakt voor gebruik in dit onderzoek. Het gaat om storingen in buizen en verbindingen. De storingen veroorzaakt door derden of vanwege verkeerde aanleg zijn eruit gefilterd. Alleen de storingen en leidingen in het gebied waarvan satellietdata bekend is zijn gebruikt voor de materialen waarvoor de verouderingsmodule geschikt is. Dit komt neer op 1.217 storingen, waarvan 983 in AC, 36 in GG en 198 in PVC. De totale leidinglengte hiervoor is 3.187 km, waarvan 2.150 km AC, 115 km GG en 922 km PVC.

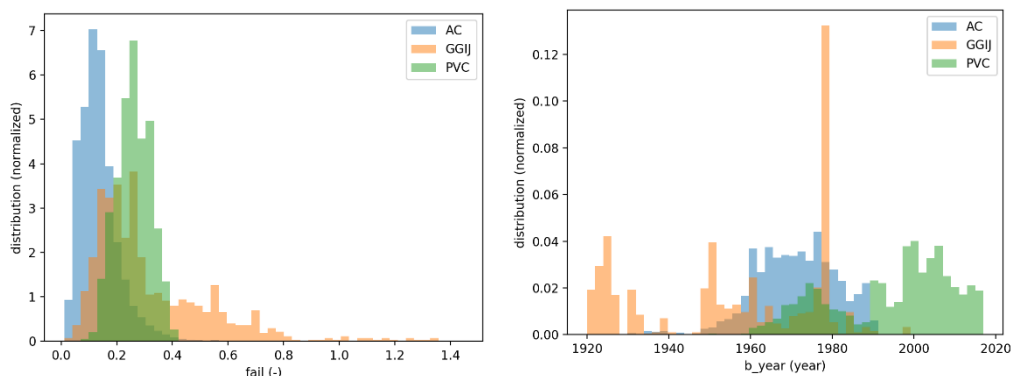
De storingen zijn gekoppeld aan het leidingnetbestand, waaraan ook de Comsim resultaten zijn toegevoegd. Op deze manier zijn cohorten gemaakt op basis van leidingmateriaal en berekende spanningen en/of hoekverdraaiingen en is voor elk cohort de storingsfrequentie bepaald. Omdat sommige leidingen over de periode 2009-2017 vervangen zijn, is voor ieder jaar een leidingnetbestand gemaakt, zodat een storing aan de juiste leiding toegekend kan worden (om te voorkomen dat een storing in 2010 op een AC-leiding niet meer meegenomen kan worden, omdat deze is vervangen door een PVC-leiding in 2011). Meer details over het toekennen van de storingen aan leidingen zijn beschreven in Moerman (2017).

5.3 Resultaten berekeningen Comsima en vergelijking met storingen

Comsima berekent de spanning in de leiding en hoekverdraaiing in de verbinding. Figuur 5-2 laat de verdeling van de spanningen en hoekverdraaiing zien over alle leidingen. Combineren van de spanning en hoekverdraaiingen door het maximum te nemen van beide waarden voor iedere leiding geeft een faalparameter (fail). Omdat de genormaliseerde spanning meestal groter is dan de genormaliseerde hoekverdraaiing, heeft de faalparameter nagenoeg dezelfde verdeling als de spanning (Figuur 5-3). Over het algemeen zijn de spanningen aan de lage kant: voor AC zijn de meeste spanningen niet hoger dan 30-40% van de toelaatbare spanning met een piek rond de 10%. Voor PVC zijn de spanningen iets hoger, met een piek van tussen de 20-30% van de toelaatbare spanning. De spanningen in de gietijzeren leidingen zijn het hoogst, mede door de hogere leeftijd van deze leidingen (zie Figuur 5-3, rechts).



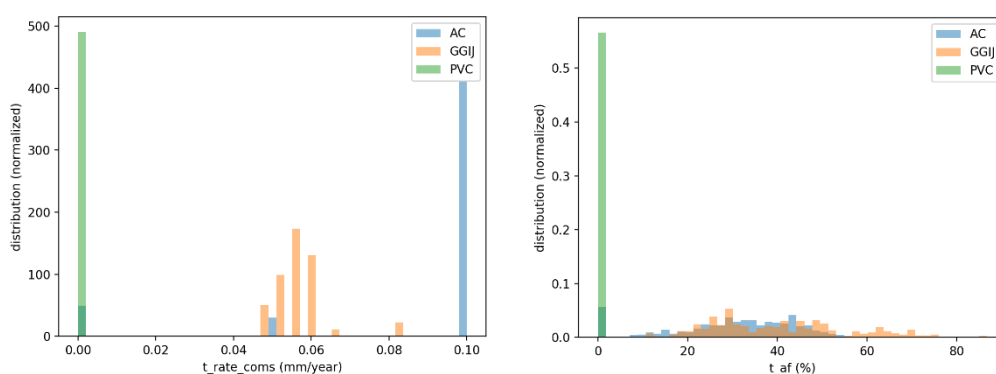
FIGUUR 5-2 VERDELING VAN DE BEREKENDE HOEKVERDRAAIING (LINKS) EN SPANNING (RECHTS) IN COMSIMA VOOR EEN GEDEELTE VAN HET PWN GEBIED. SPANNINGEN EN HOEKVERDRAAIINGEN ZIJN GENORMALIZEERD TEN OPZICHTE VAN DE TOELAATBARE WAARDEN.



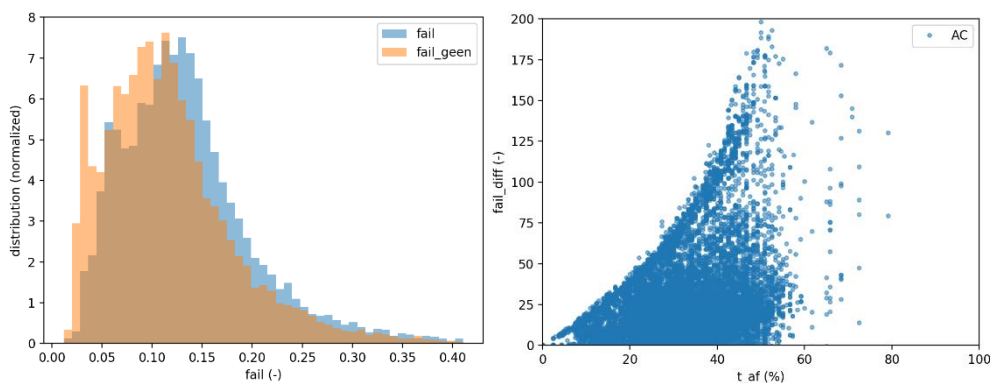
FIGUUR 5-3 VERDELING VAN DE FAALPARAMETER (COMBINATIE VAN SPANNING EN HOEKVERDRAAIING, LINKS) EN AANLEGJAAR VAN DE BEREKENDE LEIDINGEN.

Het belangrijkste verouderingsmechanisme voor AC- en GGIIJ-leidingen is de afname van de wanddikte. Figuur 5-4 geeft de verdeling van de afname in wanddikte (mm/jaar) van de leiding en de totale afname ten opzichte van de originele wanddikte. De meeste AC leidingen hebben een afname van 0.1 mm/jaar, die afhankelijk van hun leeftijd leidt tot een procentuele afname in wanddikte van 10-50%. Deze afnames van wanddiktes zijn vrij hoog in vergelijking met observaties bij PWN. Hierbij dient opgemerkt te worden dat dit in het KSLB conservatieve schattingen zijn gemaakt van de afname in wanddikte. Bij gietijzer is de totale afname in wanddikte nog wat groter, omdat sommige van deze leidingen een hogere leeftijd hebben.

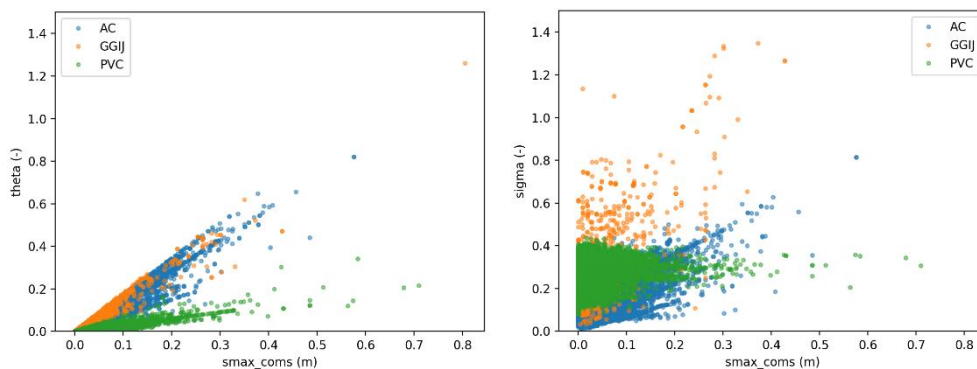
Ondanks de afname in gemiddelde wanddikte blijven de AC-leidingen met een afgenomen wanddikte van maximaal 50% goed bestand tegen de interne druk en zettingen, wat de relatief lage spanningen verklaart. Er is wel een toename in spanningen als gevolg van de afgenomen wanddikte, maar deze spanningen blijven laag (zie Figuur 5-5). Hierin speelt ook mee dat de stijfheid van de leiding afneemt bij een afnemende wanddikte, met als gevolg dat de buis makkelijker kan meebewegen met de opgelegde zetting. Een AC leiding kan bovendien vanwege de steun van de interne druk (het zogenaamde rerounding effect, dit geeft extra sterkte aan de buis door de interne druk) bij kleine wanddiktes relatief veel belasting hebben. Echter, kleine variaties (bijv. drukschommelingen) kunnen dan snel leiden tot bezwijken (deze variaties worden niet meegenomen in Comsima).



FIGUUR 5-4 AFNAME VAN WANDDIKTE ZOALS BEREKEND DOOR HET VEROUDERINGSMODEL: AFNAME PER JAAR (LINKS) EN RELATIEVE AFNAME VAN DE WANDDIKTE TEN OPZICHTE VAN DE ORIGINALE WANDDIKTE (RECHTS).



FIGUUR 5-5 (LINKS) VERDELING VAN DE FAALPARAMETER ZONDER VEROUDERING (ORANJE) EN MET VEROUDERING (BLAUW). (RECHTS) DE PROCENTUELE TOENAME IN DE WAARDE VAN DE FAALPARAMETER (TEN OPZICHTE VAN DE SITUATIE ZONDER VEROUDERING) (FAIL_DIFF) IS UITGEZET TEGEN DE PROCENTUELE AFNAME (T_AF) VAN DE WANDDIKTE (RECHTS). EEN GROTERE AFNAME IN WANDDIKTE LEIDT IN VEEL GEVALLEN TOT EEN GROTERE WAARDE VAN DE FAALPARAMETER.



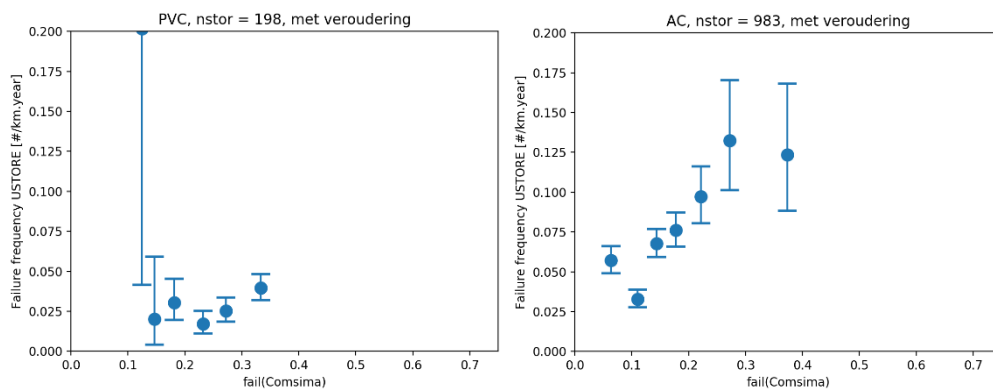
FIGUUR 5-6 TOTALE ZETTING VAN DE LEIDING (SMAX_COMS) UITGEZET TEGEN DE BEREKENDE HOEKVERDRAAIING (THETA, LINKS) EN SPANNING (SIGMA, RECHTS) VOOR DE DRIE BEREKENDE LEIDINGMATERIALEN. IEDERE PUNT REPRESENTEERT EEN LEIDINGSEGMENT.

De uit de satellietdata verkregen zetting op een leiding is uitgezet tegen de spanning en hoekverdraaiing (Figuur 5-6). Voor alle leidingmaterialen is er een duidelijk verband zichtbaar tussen hoekverdraaiing en zetting: meer zetting leidt tot een grotere hoekverdraaiing. Bij PVC-verbindingen leidt een grotere zetting echter tot een kleinere toename in hoekverdraaiing (ten opzichte van de toelaatbare hoekverdraaiing van 5 graden per verbinding) dan bij de andere leidingmaterialen. Omdat een PVC-leiding slapper is (lagere elasticiteitsmodulus en kleinere wanddikte) dan een AC- of GGJ-leiding zal een deel van de hoekverdraaiing opgevangen worden als buiging in de buis. Echter, vanwege de lagere E-modulus leidt deze buiging niet tot extra veel spanningen (Figuur 5-6, rechts) ten opzichte van de spanning door grondbelasting en interne druk. Volgens het model is PVC hiermee maar beperkt gevoelig voor zettingen. Uit de storingsgegevens blijkt echter dat AC en PVC leidingen een significant hogere storingsfrequentie hebben in de meer zettingsgevoelige gebieden (Tabel 5-1). Mogelijk dat andere faalmechanismen die niet in Comsima zijn meegenomen (zoals uitschuiven van verbindingen) hier een rol spelen.

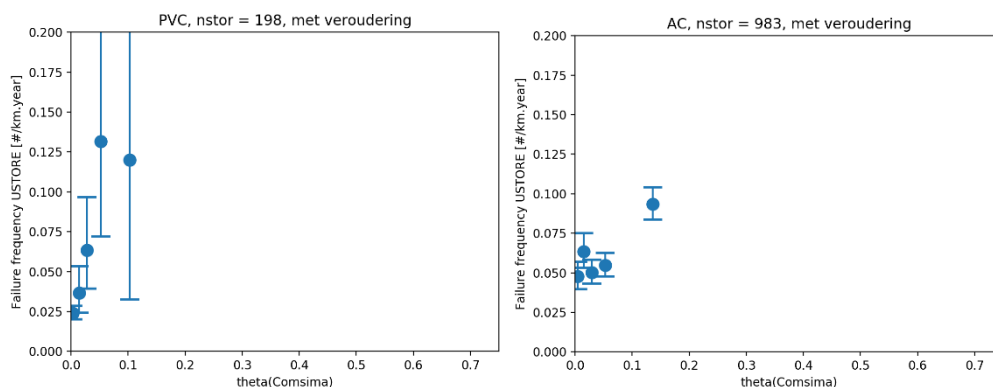
TABEL 5-1 EFFECT VAN ZETTINGSVERSCHIL (GEMETEN MET SATELLIETDATA) OP DE STORINGSFREQUENTIE. DE 95% ONZEKERHEIDSBANDEN STAAN TUSSEN HAAKJES AANGEGEVEN.

	Veel zettingsverschil (>1 mm/jr)		Weinig zettingsverschil (0-1 mm/jr)	
	Freq (#/km/yr)	# storingen	Freq (#/km/yr)	# storingen
AC	0,071 (0,064; 0,078)	405	0,058 (0,053; 0,063)	578
PVC	0,042 (0,034; 0,052)	92	0,023 (0,028; 0,019)	106
GGJ	0,046 (0,024; 0,080)	12	0,046 (0,029; 0,068)	24

De berekende faalparameter en hoekverdraaiing is in Figuur 5-7 en Figuur 5-8 uitgezet tegen de storingsfrequentie voor AC- en PVC-leidingen. Deze figuren laten het resultaat van de validatie met storingen zien, namelijk of de leidingen met hoge spanningen en/of hoekverdraaiingen ook daadwerkelijk meer storen. Voor GGIJ-leidingen waren er te weinig storingen om zinvolle resultaten te krijgen. Bij AC-leidingen is er een duidelijk verband: de storingsfrequentie is hoger voor de leidingen waarin volgens Comsima hogere spanningen heersen. Voor PVC-leidingen is dit verband ook duidelijk zichtbaar voor hoekverdraaiing. Ondanks dat de waarde van de hoekverdraaiing aan de lage kant zit, neemt de storingsfrequentie wel sterk toe met de hoekverdraaiing. Het verband met spanningen is bij PVC veel minder overtuigend dan voor AC-leidingen. Dit heeft mogelijk te maken met de onderschatting van het effect van zetting op de berekende spanning in Comsima. Daarnaast houdt de veroudering ook geen rekening met de grote variatie die gezien wordt in de toelaatbare spanning voor PVC leidingen. Omdat gebruik gemaakt wordt van de normgetallen voor toelaatbare spanning over de tijd voor PVC leidingen, zal een PVC-leiding ook na meer dan 100 jaar nog een spanning van 21 MPa aankunnen volgens het model. Echter, voor sommige leidingen geldt dat deze spanning te hoog zal zijn. Hiermee wordt voor een deel van de leidingen waarschijnlijk de toelaatbare spanning overschat.

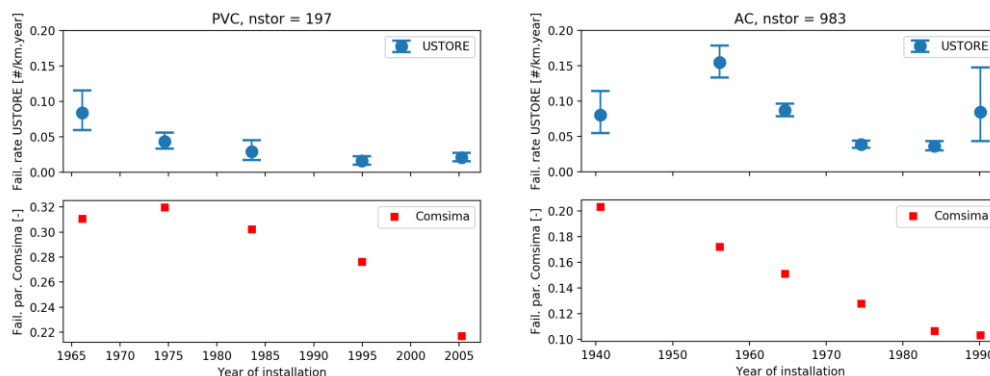


FIGUUR 5-7 FAALPARAMETER (COMBINATIE SPANNING EN HOEKVERDRAAIING) BEREKEND IN COMSIMA UITGEZET TEGEN DE STORINGSFREQUENTIE UIT USTORE VOOR PVC-LEIDINGEN (LINKS) EN AC-LEIDINGEN (RECHTS)



FIGUUR 5-8 HOEKVERDRAAIING BEREKEND IN COMSIMA UITGEZET TEGEN DE STORINGSFREQUENTIE UIT USTORE VOOR PVC-LEIDINGEN (LINKS) EN AC-LEIDINGEN (RECHTS)

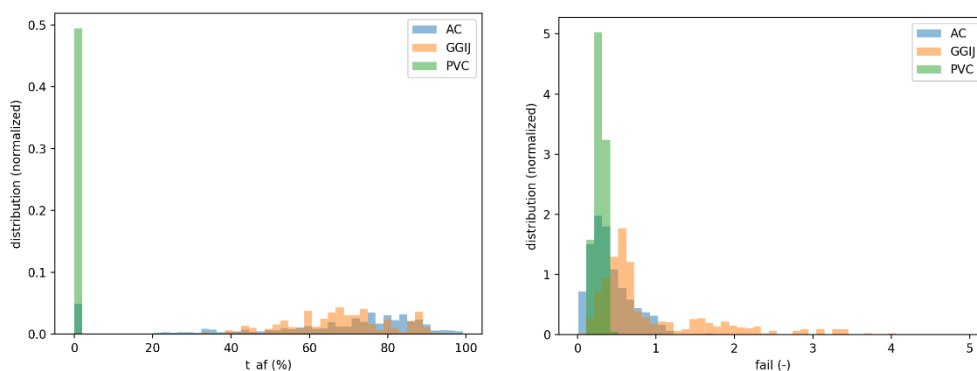
Daarnaast is voor zowel de storingsfrequenties als de berekende spanningen en hoekverdraaiingen (weergegeven met de faalparameter) een verloop met de leeftijd van de leiding gemaakt in Figuur 5-9. Hiervoor zijn er cohorten gedefinieerd per bouwjaarcategorie van 10 jaar (en 25 jaar <1950). Voor ieder bouwjaarcohort is de storingsfrequentie, het gemiddelde bouwjaar en gemiddelde spanning en hoekverdraaiing bepaald, welke uitgezet zijn in Figuur 5-9. Hier laat Comsima voor zowel AC als PVC hetzelfde beeld zien als USTORE: de waarde van de storingsfrequentie en faalparameter neemt toe met de leeftijd van de leiding. Een uitzondering is AC van voor 1950, welke een lagere storingsfrequentie hebben en het PVC van de jaren 70 heeft volgens Comsima een (licht) hoger faalgetal, omdat hier rekening is gehouden met een slechtere kwaliteit van het PVC (zie 2.4).



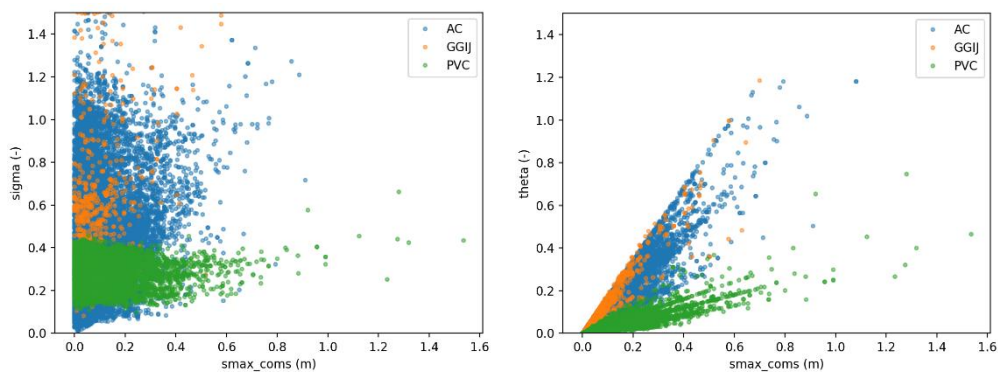
FIGUUR 5-9 VERLOOP VAN STORINGSFREQUENTIES UIT USTORE (BOVEN) EN FAALPARAMETER UIT COMSIMA (ONDER) OVER DE LEEFTIJD (WEERGEGEVEN ALS BOUWJAAR) VOOR PVC (LINKS) EN AC (RECHTS)

5.4 Voorbeeld berekening over 50 jaar

Naast een Comsima-berekening voor 2017 is een voorbeeldberekening uitgevoerd voor over 50 jaar. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat het leidingnet hetzelfde blijft en worden de verouderingsprocessen en zettingen geëxtrapoleerd naar 50 jaar later. Daarbij is voor de AC- en GGIJ-leidingen de wanddikte afgenomen met 50-90% van de originele wanddikte. Voor PVC-leidingen speelt dit geen rol. Hierdoor zijn de spanningen en daarmee de faalparameter voor GGIJ en AC leidingen sterk toegenomen. Een ander effect is de toename van de zetting. Hierdoor neemt de hoekverdraaiing ook sterk toe (Figuur 5-11, rechts). Voor de spanningen is dit minder eenduidig, omdat hier ook de andere belastingen en daarmee de afname in wanddikte een belangrijke rol spelen. De veroudering voor PVC zoals die nu in het model zit, laat een beperkte toename in spanning en hoekverdraaiing zien, met name door een toename in zetting. Het effect van de afgenomen toelaatbare spanning bij PVC vanwege het 50 jaar lang extra belasten is klein; hierdoor neemt de toelaatbare spanning maar met 1 of 2 MPa af (bijvoorbeeld van 22 MPa naar 21 MPa, afhankelijk van de leeftijd).



FIGUUR 5-10 COMSIMABEREKENING OVER 50 JAAR (2067) BIJ GELIJKBLIJVEN DISTRIBUTIENET: VERDELING VAN PROCENTUELE AFNAME WANDDIKTE (t_{af}) (LINKS) EN VERDELING VAN FAALPARAMETER (FAIL) (RECHTS)



FIGUUR 5-11 TOTALE VERSCHILZETTING VAN EEN LEIDING (s_{max_coms}) UITGEZET TEGEN BEREKENDE SPANNING (LINKS) EN HOEKVERDRAAIING (RECHTS) VOOR EEN COMSIMA BEREKENING NA 50 JAAR.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Comsima berekent spanningen in leidingen als gevolg van diverse belastingen die aangrijpen op de leiding (grondbelasting, verkeerbelasting, interne druk, zetting). De berekende spanningen zijn in eerste instantie bepaald voor de onaangetaste leiding. In dit rapport is beschreven hoe een verouderingsmodule is toegevoegd. Op deze manier kan het effect van de leeftijd van de leiding beter meegenomen worden. Daarnaast kan voor de toekomst berekend worden hoe de spanningen en/of hoekverdraaiingen toenemen.

Voor de verouderingsmodule is gebruik gemaakt van gegevens van het KSLB. Voor AC en GGJ zijn dit regels die de afnemende wanddikte bepalen als functie van de waterkwaliteit en grondeigenschappen. Voor PVC gaat het om een afnemende toelaatbare spanning over de tijd (als gevolg van weerstand tegen langzame scheurvorming). Daarnaast nemen aan de belastingkant de (verschil)zettingen toe in de tijd.

Van Comsima inclusief veroudering is een demo-versie van een tool gemaakt, die geldt voor berekeningen aan een enkele leiding. Met deze tool kan de verwachte spanning in combinatie met de afgenomen wanddikte als functie van de leeftijd berekend worden. Ook kan een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd worden evenals een Monte-Carlo-analyse met en zonder veroudering.

Comsima met veroudering is daarnaast vergeleken met storingsgegevens voor een deelgebied van PWN. Hierbij is gebruik gemaakt van satellietgegevens om de zettingsverschillen te berekenen. De vergelijking laat zien dat groepen leidingen met een hogere spanning en/of hoekverdraaiing ook een hogere storingsfrequentie hebben. Dit verband is sterker voor AC leidingen dan voor PVC leidingen. Comsima met veroudering lijkt het effect van zetting te onderschatten voor PVC. Mogelijk dat hierbij een (verouderings)mechanisme gemist wordt. Bovendien zit er veel variatie in de toelaatbare spanning van PVC. In het huidige model wordt echter uitgegaan van de (afname van de) toelaatbare spanning volgens de norm en wordt geen rekening gehouden met de variatie.

6.2 Aanbevelingen

Comsima met veroudering laat over het algemeen zien dat de leidingen met hogere spanningen ook een hogere storingsfrequentie hebben. Hiermee kan het model in zijn huidige vorm al ingezet worden om vervangingsstrategie te ondersteunen. Waterbedrijven kunnen daarnaast de demonstratieversie van de tool gebruiken om voor individuele of groepen leidingen een inschatting te maken van de spanningen en hoekverdraaiingen. Een aantal verbeteringen zijn van belang om mee te nemen:

- De uitwerking laat een verband zien tussen de berekende spanningen in Comsima en de storingsfrequentie. Er kan echter nog geen directe inschatting gemaakt worden van de storingsfrequentie met Comsima. De mogelijkheden hiervan moeten verder onderzocht worden, bijvoorbeeld aan de hand van de berekende hazard (#/jaar) als functie van de leeftijd van de leiding (rekening houdend met de segmentlengte).
- De gevoeligheden van de onzekerheden van de parameters in de Monte-Carlo-analyse op de resultaten onderzoeken. Hieruit volgen parameters waarvan het

resultaat gevoelig is voor de verdeling, waarvan een goed onderbouwde keuze in de onzekerheidsparameters (kansdichtheidsfunctie) gemaakt worden.

- De verouderingsmodule is gebaseerd op bestaande kennisregels van het KSLB. De nauwkeurigheid van de verouderingsmodule is daarom op zijn best net zo goed als de kennisregels. Zo zijn de uitlogingssnelheden voor AC leidingen aan de hoge kant. In de toekomst kan dit verbeterd worden door meer resultaten van inspecties toe te voegen. De verbeterde kennisregels kunnen vervolgens vrij eenvoudig ingepast worden in de verouderingsmodule.
- Bij zowel uitloging als corrosie wordt gerekend met een uniforme afname van de wanddikte. In de praktijk blijkt echter dat corrosie, maar recent zijn hier ook aanwijzingen voor bij uitwendige uitloging, sterk kan variëren over zowel de omtrek als de lengte van de leiding. Dit kan een ander mechanisch gedrag geven dan een uniforme uitloging (zo zal de buigstijfheid van de buis bij een lokale afname van de wanddikte veel minder afnemen dan bij een uniforme afname).
- Voor andere materialen kennisregels omtrent veroudering toevoegen, bijvoorbeeld PE en NGIJ.
- Aan de sterkte kant van het model worden waarden voor toelaatbare spanning en hoekverdraaiing gebruikt. Aanbevolen wordt om beter te onderzoeken of deze kentallen altijd kloppen en of er veel variatie zit in deze kentallen. Zo loopt er momenteel een onderzoek naar de toelaatbare hoekverdraaiing van PVC leidingen (BTO 2017.083)
- Bij de afnemende toelaatbare spanning als gevolg van weerstand tegen langzame scheurvorming bij PVC leidingen wordt uitgegaan van een constante spanning in de tijd. De spanning als gevolg van zetting is echter niet constant over de tijd: deze neemt toe als gevolg van toenemende zetting en ook deels weer af als gevolg van relaxatie. Aanbevolen wordt om te onderzoeken hoe groot dit effect is en indien dit effect significant is, om dit te mee te nemen in Comsima.
- Voor het verouderingsmodel van gietijzer wordt onder meer gebruik gemaakt van de corrosie-index (CI). Als gevolg van een update van de mededeling 100 is de CI niet meer relevant. Voor het verouderingsmodel zal daarom mogelijk een alternatieve parameter van inwendige corrosie gezocht moeten worden.
- Bij de verwerking van de satellietdata is gebruik gemaakt van de maximale verschilzetting, uitgaande dat de leiding ergens ook geen zetting krijgt. Deze verschilzetting is bepaald op segmenten van 5 m, waarvan vervolgens de maximale waarde vertaald is naar de volledige leiding, die gebruikt is in de Comsima analyse. De analyses met de satellietdata kunnen mogelijk ook nauwkeuriger uitgevoerd worden door de Comsima berekening op segmentniveau uit te voeren en de verschilzetting met de buursegmenten te nemen. Deze aanbeveling zal samen met PWN opgepakt worden in een adviesproject (voor Comsima zonder veroudering).
- Een nauwkeurigere validatie kan uitgevoerd worden als er voor een groter gebied satellietdata van zettingen beschikbaar komt, zodat meer cohorten (bijv. naar diameter of aanlegjaar) onderzocht kunnen worden. Hiermee kunnen eventuele verschillen tussen het model en storingsgegevens beter geduid worden.

6.2.1 Ontwikkelingsmogelijkheden Comsima

Voor verdere ontwikkeling van Comsima kan gedacht worden aan extra of andere belastingen die kunnen optreden, en daarnaast aanvullingen om de sterkte van de leiding beter in kaart te brengen.

Voor de belastingen zijn dit onder meer:

- drukvariaties en kortstondige drukgolven;

- effecten van bochten;
- axiale spanningen als gevolg van temperatuurvariaties;
- bijzondere belastingsituaties (grondwerk, constructies).

Voor de sterkte zijn dit:

- anisotroop materiaalgedrag: sommige materialen kunnen in de ene richting meer spanning opnemen dan in een andere richting;
- plastische vervorming,
- nauwkeurigere bepaling van toelaatbare hoekverdraaiingen en stijfheid van de hoekverbinding;
- effect temperatuur: afname toelaatbare spanning.

Referenties

Alterra (2006a). Bodemkaart: <http://www.wageningenur.nl/nl/show/Bodemkaart-1-50-000.htm>, bezocht op 1 juni 2016.

Alterra (2006b). Grondsoortenkaart 2006: <http://www.wageningenur.nl/nl/show/Grondsoortenkaart.htm>, bezocht op 1 juni 2016.

Beuken, R.H.S. en Mesman, G.A.M. (2011). Kennissysteem levensduurbepaling versie 2.0, BTO 2011.113(s), KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

Beuken, R. H. S. en Moerman, A., (2017). PCD 9 Uniforme Storingsregistratie, Rapport nr. PCD 9 2017, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

Stichting voor bodemkartering (1964). Bodemkaart van Nederland 1:50000, Toelichting bij blad 43 West Willemstad, Wageningen, https://www.zeeuwsbodemvenster.nl/sites/zl-bodemvenster/files/toelichting_bodemkaart_blad_43west.pdf, bezocht op 1 december 2017

Kadaster (2016). TOP10NL: <http://www.kadaster.nl/web/artikel/producten/TOP10NL.htm>, bezocht op 1 juni 2016.

Koppejan, A. W. (1948). A formula combining the Terzaghi load compression relationship and the Buisman secular time effect. 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam.

Moerman, A., (2017), Spanningen en storingsfrequenties voor drinkwaterleidingen van PWN, KWR 2017.092, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

Van Laarhoven, K., Wols, B.A., (2017). De maximaal toelaatbare hoekverdraaiing van PVC verbindingen, berekend met FEM, BTO 2017.083, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

Tabak, A. en Maljaars, H. (2017). Memo: Beknopte uitleg kaartlagen InSAR analyse, SkyGeo, Delft.

Van Daal, K. and B. A. Wols (2012). Spanningsberekeningen voor leidingen als gevolg van grond-leidinginteractie: modelimplementatie in GIS. BTO 2012.242(s), KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

de Vries, F., W.J.M. de Groot, T. Hoogland, J. Denneboom (2003). De Bodemkaart van Nederland digitaal; Toelichting bij inhoud, actualiteit en methodiek en korte beschrijving van additionele informatie. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 811, <http://edepot.wur.nl/21850>, bezocht op 1 december 2017.

Vrouwenfelder, A. C. W. M. and A. J. M. Siemes (1987). "Probabilistic calibration procedure for the derivation of partial safety factors for the Netherlands building codes." Heron 32(4): 9-29.

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

Wols, B. A. en Moerman, A., (2015b). COMSIMA: model voor spanningen op ondergrondse leidingen, BTO 2015.206(s), KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.