

TKI Deltatechnologie

Faalkansmodel voor asset management van persleidingen – Fase 2

TNO 2024 R10084 – 15 januari 2024

Faalkansmodel voor asset management van persleidingen – Fase 2

TKI Deltatechnologie

Auteurs	Ir. L.C. la Gasse Dr.ir. W.M.G. Courage A.I. Martinez Colán H. Kruse (Deltares) D. Nugroho (Deltares) J. Langeveld (Partners4UrbanWater) J. Post (Partners4UrbanWater) K. Makris (Partners4UrbanWater)
Rubricering rapport	TNO Vertrouwelijk
Titel	TNO Vertrouwelijk
Rapporttekst	TNO Vertrouwelijk
Aantal pagina's	92 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	TKI Deltatechnologie, RIONED, Stowa, Aa en Maas, Gemeente Rotterdam, Waternet, Schmidt Waternet B.V.
Projectnaam	Faalkansmodel voor assetmanagement van persleidingen
Projectnummer	060.39951



Onze partners

PARTNERS4URBANWATER
onderzoek & advies

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2024 TNO

Samenvatting

Aanleiding

In Nederland ligt 13.000 km persleiding, waarvan een groot deel stamt uit de jaren '70. De huidige faalkans is in de afgelopen jaren toegenomen van ca. 1 incident per 100 km/jaar naar 1,5 incident per jaar. In combinatie met het gegeven dat veel leidingen hun ontwerplevensduur (van 50 jaar) naderen of reeds zijn gepasseerd, wordt in de sector breed de urgentie gevoeld meer grip te krijgen op de conditie- en restlevensduurbepaling ten behoeve van besluitvorming ten aanzien van onderhoud en vervanging van persleidingen.

De basis voor de restlevensduurbepaling is de actuele conditie van de persleiding. De actuele conditie van een (pers)leiding kan worden vastgesteld op basis van inspecties of ingeschat met behulp van een fysisch gebaseerd verouderingsmodel. De afgelopen jaren is de toepassing van persleidinginspecties op gang gekomen, waardoor steeds meer inspectiegegevens beschikbaar komen. Dit biedt een goede basis voor de doorontwikkeling van het faalkansmodel.

De vraag die boven de sector hangt is hoe op een zo doelmatig mogelijke manier ingeschat kan worden wat de resterende levensduur van een leiding is, zodat het vervangingsmoment zo gekozen kan worden dat de leiding wordt vervangen juist voordat de faalfrequentie toe begint te nemen of boven de voor de beheerder acceptabele waarde komt.

Projecthistorie

In 2016 hebben TNO en Rotterdam het initiatief genomen om een Plan van Aanpak (PvA) op te stellen voor de ontwikkeling van een faalkansmodel voor asset management van persleidingen, met als doel het vervangingsmoment van persleidingen te optimaliseren. In dit PvA is een traject geschetst dat bestaat uit drie fasen:

Fase 1. Proof of principle: ontwikkelen 1^e versie faalkansmodel en aantonen dat dit leidt tot een werkbaar principe

Fase 2. Proof of concept: Doorontwikkeling in 2^e versie faalkansmodel, waarbij het model in conceptueel opzicht compleet wordt gemaakt door een combinatie van verbreden (toevoegen ontbrekende faalmechanismen) en verdiepen (meenemen informatie uit inspecties)

Fase 3. Proof of producibility: Koppeling van faalkansmodel aan bestaande asset management systemen en concept voor userinterface (demonstratie userinterface)

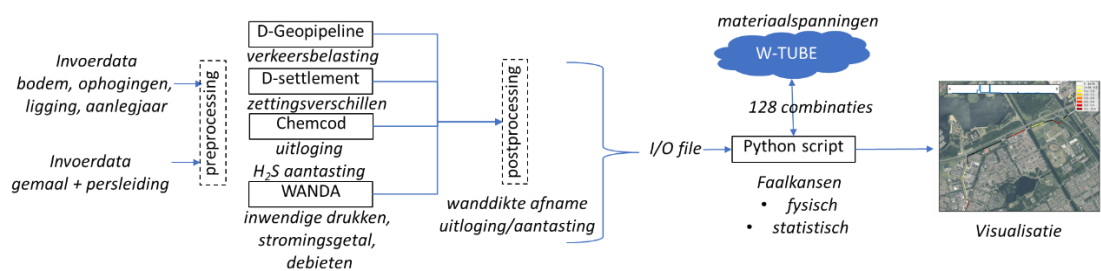
Fase 1 is afgerond in 2019. Deze fase is gefinancierd en ondersteund door een consortium bestaande uit Rotterdam, Waternet, RIONED en STOWA, waarbij aanvullende financiering is verkregen uit de TKI Deltatechnologie. De resultaten van fase 1 zijn opgenomen in TNO rapport TNO 2019 R10463 faalkansmodel persleidingen – Proof of Principle.

Fase 2 is afgerond in 2023 met de oplevering van dit rapport. Ten opzichte van fase 1 is het faalkansmodel verbreed met de toevoeging van uitlogging, hydraulisch functioneren, kunststof buismaterialen, koppelingen, ontluchters en schade door derden. Daarnaast is mede dankzij de toepassing van parallel computing in de cloud het aantal door te rekenen combinaties fors verhoogd, waardoor een meer accurate bepaling van de faalkans mogelijk is.

De voorbereiding voor Fase 3, de brede toepassing in de praktijk, is opgestart

Faalkansmodel persleidingen

Het faalkansmodel persleidingen berekent de kans op falen van een persleiding ten gevolge van de dominante faalmechanismen uit de praktijk: ongelijke zetting, afname gezonde wanddikte door uitloging en aantasting, vervorming, over- en onderdruk en schade door derden. Deze fysisch gebaseerde faalmechanismen rekt het faalkansmodel probabilistisch door, door bestaande Deltares software als WANDA, D-settlement en D-Geopipeline en TNO software W-Tube slim te combineren. De schade door derden wordt via een daartoe ontwikkeld statistisch model berekend. Het faalkansmodel levert als resultaat shapefiles met de faalkans van de leiding per leidingsegment en shapefiles met informatie per faalmechanisme. Onderstaande figuur geeft een overzicht van de verschillende componenten en het daaraan gekoppelde werkproces.



Het faalkansmodel en de daartoe ontwikkelde werkstappen zijn uitgetest op 10 diverse cases, zie onderstaande tabel.

Tracé	Waterschap	Lengte [m]	Materiaal	Aanleg jaar	Diameter [mm]
Munstergeleen-Geleen	Waterschapbedrijf Limburg	2039	AC/HDPE	1988	500
Meerlo-Oostrum	Waterschapbedrijf Limburg	6598	AC/staal/GVK	1985	700
Mill-Achterdijk	Aa en Maas	3345	AC	1983	450
Heiligenberg – RWZI	Aa en Maas	5470	AC	1984	600
Maren Kessel - Lith	Aa en Maas	4350	AC/PVC	1974	200
Kannelust - RWZI	Aa en Maas	1394	PVC	1974	400
PL_940 Emmeloord	Zuiderzeeland	5995	PVC	1985	500
PL220 Almere	Zuiderzeeland	3810	AC/PE	1980	600
Wittelte-RWZI	Drents Overijssel Delta	6598	PVC	2022	500
AWP-1	Brabantse Delta	8400	Beton	1972	800

De 10 cases laten zien dat de berekende faalkansen goed bruikbaar zijn in de praktijk, mede doordat het faalkansmodel ook inzicht biedt in de onderliggende oorzaak. Dit maakt dat beheerders de uitkomsten van het faalkansmodel niet alleen kunnen gebruiken voor een inschatting van benodigde vervanging, maar ook voor het gericht treffen van maatregelen

en/of inspecteren van de leiding op basis van de door het faalkansmodel aangegeven relevante faalmechanismen en kwetsbare locaties. Het faalkansmodel kan het verouderen van de leiding berekenen vanaf de aanleg, maar het is ook mogelijk om de simulaties te starten op basis van de op een willekeurig moment via inspecties vastgestelde leidingkenmerken en leidingconditie. Ook is het mogelijk om met het faalkansmodel het effect van maatregelen op de faalkans door te rekenen. Hieronder vallen maatregelen als het doseren van chemicaliën waardoor biogene zwavelzuuraantasting kan worden voorkomen of het plaatsen van een windketel zodat de onderdruk bij waterslag wordt verminderd.

Het faalkansmodel is nu, na fase 2, inhoudelijk klaar om door de sector breed ingezet te gaan worden.

Vooruitblik

Het faalkansmodel persleidingen is ontwikkeld met het oog op toepassing in de praktijk. Op basis van de feedback van de begeleidingscommissie op 5 december 2023 en de positieve ontvangst van het faalkansmodel op de STOWA/RIONED persleidingenbijeenkomst van 6 december 2023 is het plan opgevat om een Community of Practice (CoP) op te richten of toe te voegen aan CAPWAT, waarin gebruikers van het faalkansmodel kennis en ervaring kunnen delen en waarbinnen de gebruikers hiertoe worden opgeleid. Daarbij wordt in eerste instantie gedacht aan medewerkers van adviesbureaus die actief zijn op het vakgebied persleidingen en aan medewerkers van beheerders die zelf modelberekeningen uitvoeren. Om dit mogelijk te maken zal een projectvoorstel gedaan worden voor fase 3 proof-of-productibility, waarin een groot aantal beheerders de vraagkant zal verzorgen en genoemde uitvoerders de aanbodkant. Het consortium TNO-Deltares-Partners4UrbanWater zal zorgen voor opleiding, doorontwikkeling van de software en interfaces en het beheer van het faalkansmodel gedurende een periode van tenminste 5 jaar.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
Inhoudsopgave	6
1 Inleiding	7
1.1 Aanleiding.....	7
1.2 Opbouw project.....	7
1.3 Aanpak: het faalkansmodel	8
1.4 Resultaten	9
1.5 Cases.....	9
2 Opbouw faalkansmodel	10
3 Input faalkansmodel	12
3.1 Algemene beschrijving invoergegevens.....	12
3.2 Benodigde informatie voor invoergegevens.....	12
3.3 Inspectiedata en incidentendata.....	14
4 Faalmechanismen.....	15
4.1 Keuze faalmechanismen	15
4.2 Zettingen	15
4.2.1 Zettingsmodel	15
4.2.2 Zettingsverschil	16
4.3 Inwendige druk	16
4.3.1 Leidingstelselmodel	16
4.3.2 Pomptoestanden voor inwendige druk	17
4.4 Wanddikte afname door gasophoping.....	18
4.4.1 Locatie gasophoping.....	18
4.4.2 Hoeveelheid gasophoping	18
4.4.3 Wanddikte afname bij 100% gasophoping voor verschillende leidingmaterialen.....	19
4.5 Wanddikte afname door (interne) uitloging	19
4.5.1 Wanddikte afname door interne uitloging voor verschillende leidingmaterialen	20
4.6 Grond-leiding interactie	20
4.6.1 Beddingconstanten en grondspanningen voor grond-leiding interactie.....	21
4.7 Constructief gedrag.....	21
4.8 Verbindingen.....	23
4.8.1 Overzicht buismaterialen en type verbindingen.....	24
4.8.2 Toleranties buisverbindingen.....	25
4.8.3 Analyse van inspectiegegevens over verbindingen	27
4.9 Appendages	30
4.9.1 Gebruikte gegevens.....	30
4.9.2 Afleiden van een faalkans voor ontlueters.....	31
5 Statistisch faalkansmodel	34
5.1 Gebruikte gegevens.....	34
5.2 Modelleren van incidenten door graafschade	35
5.3 Resultaten	36
6 Faalkansmodel.....	40
6.1 Dataflow faalkansmodel.....	40

6.2	Faalkansberekening	42
6.2.1	Weerstand leiding	44
6.2.2	Onzekerheden aan de belastingkant	45
6.3	Oprollen faalkans	45
6.4	Output	46
7	Cases	47
7.1	Faalkansen 10 cases	47
7.2	Uitwerking voorbeeld: case Almere	54
7.2.1	Beschrijving	54
7.2.2	Deelresultaten	56
7.2.3	Faalkansen	68
7.2.4	Validatie	74
7.3	Bijzonderheden overige cases	78
7.3.1	Meerlo – Oostrum	78
7.3.2	Maren Kessel - Lith	80
7.3.3	Falen koppelingen Hoeven, Heiligenberg en Almere	85
8	Valorisatie proof of concept	86
8.1	Overdraagbaarheid en praktische toepasbaarheid	86
8.2	Validatie berekende faalkansen	86
9	Conclusies en vooruitblik	88
9.1	Conclusies	88
9.2	Vooruitblik	89
10	Referenties	90
11	Ondertekening	91

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In Nederland ligt 13.000 km persleiding, waarvan een groot deel stamt uit de jaren '70. De huidige faalkans van deze persleidingen is in de afgelopen jaren toegenomen van ca. 1 incident per 100 km/jaar naar 1,5 incident per jaar (Post en Langeveld, 2023). In combinatie met het gegeven dat veel leidingen hun ontwerplevensduur (van 50 jaar) naderen of reeds zijn gepasseerd, wordt branche breed de urgentie gevoeld meer grip te krijgen op de conditie- en restlevensduurbepaling ten behoeve van besluitvorming ten aanzien van onderhoud en vervanging van persleidingen.

Conditiebepaling

Uitgangspunt voor restlevensduurbepaling is de actuele conditie van de persleiding. De conditie van een (pers)leiding kan worden vastgesteld op basis van inspecties. De afgelopen jaren is de toepassing van persleidinginspecties op gang gekomen, waardoor steeds meer inspectiegegevens beschikbaar komen (Langeveld et al., 2023). Dit biedt een goede basis voor de doorontwikkeling van het faalkansmodel.

Restlevensduurbepaling

Daar voor het bepalen van de restlevensduur de huidige conditie een belangrijke variabele is, en deze voor de meeste persleidingen niet goed bekend is, wordt voor persleidingen tot op heden veelal de beheerstrategie 'fail and fix' gehanteerd. Dit houdt in dat alleen reactief wordt ingegrepen bij problemen. Bij leidingen die 'too big to fail' zijn, is dit binnen de zich ontwikkelende asset management strategieën niet meer houdbaar en wordt tegenwoordig ofwel ingezet op kostbaar incidenteel onderzoek ofwel ingezet op vervanging.

De vraag die boven de sector hangt is hoe op een zo doelmatig mogelijke manier ingeschat kan worden wat de resterende levensduur van een leiding is, zodat het vervangingsmoment zo gekozen kan worden dat de leiding wordt vervangen juist voordat de faalfrequentie toe begint te nemen of boven de voor de beheerder acceptabele waarde komt.

1.2 Opbouw project

In 2016 hebben TNO en Rotterdam het initiatief genomen om een Plan van Aanpak (PvA) op te stellen voor de ontwikkeling van een faalkansmodel voor asset management van persleidingen, met als doel het vervangingsmoment van persleidingen te optimaliseren. In dit PvA is een traject geschetst dat bestaat uit drie fasen:

Fase 1. Proof of principle: ontwikkelen 1^e versie faalkansmodel en aantonen dat dit leidt tot een werkbaar principe.

Fase 2. Proof of concept: Doorontwikkeling in 2^e versie faalkansmodel, waarbij het model in conceptueel opzicht compleet wordt gemaakt door een combinatie van verbreden (toevoegen ontbrekende faalmechanismen) en verdiepen (meenemen informatie uit inspecties).

Fase 3. Proof of producibility: Koppeling van faalkansmodel aan bestaande asset management systemen en concept voor userinterface (demonstratie userinterface).

Fase 1 is afgerond in 2019. Deze fase is gefinancierd en ondersteund door een consortium bestaande uit Rotterdam, Waternet, RIONED en STOWA, waarbij aanvullende financiering is verkregen uit de TKI Deltatechnologie. De resultaten van fase 1 zijn opgenomen in TNO rapport TNO 2019 R10463 faalkansmodel persleidingen – Proof of Principle. De consortiumpartners hebben op basis van de resultaten van fase 1 aangegeven op dezelfde voet verder te willen gaan met fase 2.

Onderhavige rapport beschrijft de wijze waarop het uitvoerend consortium, bestaande uit de kennispartners TNO, Deltares en Partners4UrbanWater invulling heeft gegeven aan fase 2: Proof of Concept.

1.3 Aanpak: het faalkansmodel

De in dit project gekozen aanpak om de restlevensduur van persleidingen te bepalen is het ontwikkelen van een asset management tool op basis van een faalkansmodel. De tool berekent een faalkans op basis van aanwezige kennis en informatie over de sterkte van, belasting op en slijtage van de leiding.

Het middel (de asset management tool) dat hiervoor op termijn voorzien wordt, is een via GIS ontsloten tool, die voor elk leidingsegment op basis van het faalkansmodel de conditie op een tijdstip voorspelt op basis van:

- input van de beheerder zelf
 - over kenmerken van de leiding; denk aan diameter, materiaal, aanlegjaar;
 - over de conditie; denk aan uitkomsten van eventueel uitgevoerde inspecties en incidenten;
- informatie over omstandigheden; denk aan omgevingsfactoren als grondsoorten, verkeersbelastingen, etc.

De tool zal vervolgens de bepaalde conditie combineren met door de beheerder gestelde randvoorwaarden met betrekking tot het belang van de leiding(integriteit) van het segment. Op basis van deze combinatie kan een score toegekend worden aan de conditie zelf en aan de zekerheid daarover op een door de beheerder te variëren tijdschaal. Op termijn zouden ook beheermaatregelen aan de tool gekoppeld kunnen worden, zodat de (potentiële) effecten daarvan modelmatig getest kunnen worden, zodat inzicht wordt verkregen in het effect van de betreffende beheersmaatregelen op de verschillende scores.

De doorontwikkeling van het faalkansmodel als onderdeel van fase 2 Proof of Concept omvat de volgende aspecten ten opzichte van de in het rapport TNO 2019 R10463 faalkansmodel persleidingen – Proof of Principle beschreven basisopzet:

- Verdieping:
 - Verfijnen en verder uitwerken van het raamwerk voor de faalkansen (inbrengen van data uit inspecties, bewezen sterkte, beschouwingen over tijd en orollen van faalkansen).
 - Meenemen gedrag en eigenschappen van koppelingen.
- Verbreding:
 - Toevoegen van operationele component op basis van hydraulische modellen.
 - Toevoegen van uitloging.
 - Toevoegen van kunststof buismaterialen.
 - Toevoegen van ontluchters als belangrijkste appendage gerelateerd aan falen.
- Toevoegen van statistisch model voor schade door derden.
- Automatisering en versnelling door via de Cloud parallel te rekenen.

1.4 Resultaten

Het faalkansmodel persleidingen berekent de kans op falen van een persleiding ten gevolge van de dominante faalmechanismen uit de praktijk: ongelijke zetting, afname gezonde wanddikte door uitloging en aantasting, vervorming, over- en onderdruk en schade door derden. De fysisch gebaseerde faalmechanismen rekent het faalkansmodel probabilistisch door, door bestaande Deltares software als WANDA, D-settlement en D-Geopipeline en TNO software W-Tube slim te combineren. De schade door derden wordt via een daartoe ontwikkeld statistisch model berekend. Het faalkansmodel levert als resultaat shapefiles met de faalkans van de leiding per leidingsegment en shapefiles met informatie per faalmechanisme. Het faalkansmodel en de daartoe ontwikkelde werkstappen zijn uitgetest op 10 diverse cases. Deze cases laten zien dat de berekende faalkansen goed bruikbaar zijn in de praktijk, mede doordat het faalkansmodel ook inzicht biedt in de onderliggende oorzaak. Dit maakt dat beheerders de uitkomsten van het faalkansmodel niet alleen kunnen gebruiken voor een inschatting van benodigde vervanging, maar ook voor het gericht treffen van maatregelen en/of inspecteren van de leiding op basis van de door het faalkansmodel aangegeven relevante faalmechanismen en kwetsbare locaties. Het faalkansmodel kan het verouderen van de leiding berekenen vanaf de aanleg, maar het is ook mogelijk om de simulaties te starten op basis van de op een willekeurig moment via inspecties vastgestelde leidingkenmerken en leidingconditie. Ook is het mogelijk om met het faalkansmodel het effect van maatregelen op de faalkans door te rekenen. Hieronder vallen maatregelen als het doseren van chemicaliën waardoor biogene zwavelzuuraantasting kan worden voorkomen of het plaatsen van een windketel zodat de onderdruk bij waterslag wordt vermindert.

Het faalkansmodel is nu, na fase 2, inhoudelijk klaar om door de sector breed ingezet te gaan worden.

1.5 Cases

In de Proof of Concept (beschreven in onderhavig rapport) zijn 10 cases (persleidingtracés) geanalyseerd. De geanalyseerde persleidingtracés zijn in Tabel 1.1 opgenomen.

Tabel 1.1: Gegevens van geanalyseerde 10 cases (persleidingtracés)

Tracé	Waterschap	Lengte [m]	Materiaal	Aanleg jaar	Diameter [mm]
Munstergeleen-Geleen	Waterschapbedrijf Limburg	2039	AC/HDPE	1988	500
Meerlo-Oostrum	Waterschapbedrijf Limburg	6598	AC/staal/GVK	1985	700
Mill-Achterdijk	Aa en Maas	3345	AC	1983	450
Heiligenberg – RWZI	Aa en Maas	5470	AC	1984	600
Maren Kessel - Lith	Aa en Maas	4350	AC/PVC	1974	200
Kannelust - RWZI	Aa en Maas	1394	PVC	1974	400
PL_940 Emmeloord	Zuiderzeeland	5995	PVC	1985	500
PL220 Almere	Zuiderzeeland	3810	AC/PE	1980	600
Wittelte-RWZI	Drents Overijssel Delta	6598	PVC	2022	500
AWP-1	Brabantse Delta	8400	Beton	1972	800

2 Opbouw faalkansmodel

Het faalkansmodel bestaat uit een fysisch gebaseerd probabilistisch deel en een statistisch deel voor faalgebeurtenissen waarbij het onderliggende fysische proces onbekend is of waarbij de faalgebeurtenissen optreden door externe oorzaken, zoals grondwerkzaamheden. Het fysisch gebaseerde deel maakt gebruik van modellen die de meegenomen individuele verouderingsprocessen beschrijven en combineert de uitkomsten van deze modelberekeningen in een probabilistisch model.

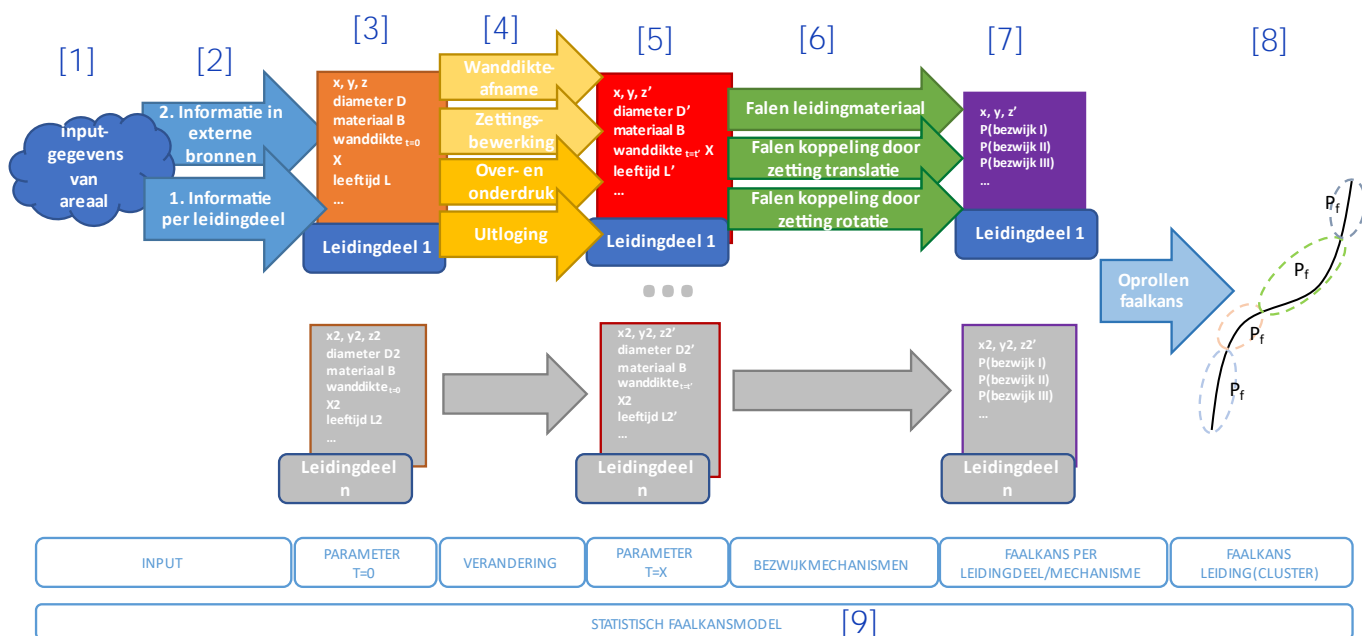
In figuur 2.1 is weergegeven welke modellen en technieken gekoppeld worden en op welke manier het faalkansmodel is opgebouwd:

- [1] Links staat de ruwe invoerdata: dit zijn de gegevens die door de beheerder worden verzameld.
- [2] De ruwe invoerdata wordt vertaald naar een set basisparameters per leidingdeel. Deze stap wordt verder beschreven in hoofdstuk 3.
- [3] Basisparameters per leidingdeel (bijvoorbeeld jaar van aanleg, wanddikte, diameter, materiaal, elasticiteit).
- [4] De basisparameters zijn onderhevig aan verandering: de modellering van deze verandering over tijd wordt gesymboliseerd in de gele pijlen in het schema (bijvoorbeeld wanddikte afname over tijd, toename zettingen in de tijd). De toegepaste deelmodellen worden besproken in hoofdstuk 4.
- [5] Na deze modelleringsslag heeft elk leidingdeel opnieuw een set eigenschappen, representatief voor een bepaald moment in de tijd.
- [6] Deze eigenschappen zijn input in de modellering van de verschillende bezwijkmechanismen, in het schema weergegeven met de donkergroene pijlen. Deze bezwijkmechanismen beschrijven elk een manier van constructief falen van de leiding zelf; het leidingmateriaal of de verbindingen. In dit rapport wordt de term bezwijkmechanisme dus gebruikt voor het constructief falen van de leiding waarvoor een faalkans kan worden bepaald. Met faalmechanisme wordt de aanleiding bedoeld waardoor een bezwijkmechanisme op kan treden, bijvoorbeeld zettingsverschillen of wanddikteafname. De toegepaste modellen worden besproken in hoofdstuk 4.
- [7] De output van de faalkansberekening is per leidingdeel per bezwijkmechanisme een kans van falen op het betreffende tijdsmoment. Dit wordt in meer detail beschreven in hoofdstuk 6.
- [8] Deze faalkansen per object per bezwijkmechanisme worden gecombineerd (opgerold) tot totale faalkansen per leiding(cluster). Ook dit wordt in meer detail beschreven in hoofdstuk 6.

Het in figuur 2.1 weergegeven faalkansmodel is object georiënteerd. Het object waaraan alle eigenschappen gekoppeld worden is een leidingdeel waarvoor de relevante eigenschappen constant zijn. Dit object heeft maximaal de grootte van de leidingstukken uit de inputgegevens van de beheerders, maar wordt waar nodig opgeknipt in kleinere onderdelen om alle faalmechanismen goed te kunnen modelleren. Dit komt in de praktijk neer op stukken leiding van één tot een aantal meters. De beschreven stappen worden voor ieder leidingdeel in een dataset (deels geautomatiseerd) doorlopen om de faalkans per leidingdeel te bepalen. Vervolgens worden deze faalkansen gecombineerd tot faalkansen per leiding(cluster) in het areaal.

Vanaf stap [3] in het schema uit figuur 2.1 zijn alle variabelen stochasten, wat betekent dat ze worden gerepresenteerd door een verdelingsfunctie (bijvoorbeeld een normale verdeling gedefinieerd door een gemiddelde waarde en een standaarddeviatie). Het faalkansmodel werkt dan ook probabilistisch; de parameters in het model zijn de stochasten met individuele kansverdelingen en de modeluitkomsten zijn kansen. Deze kansen worden vervolgens omgerekend naar frequenties (aantal faalgebeurtenissen) per km leiding, een eenheid die voor leidingbeheerders gebruikelijk is.

[9] Voor faalgebeurtenissen die niet het gevolg zijn van fysieke veroudering, maar die wel als relevant type faalgebeurtenis naar voren komen in de incidentenregistratie van persleidingen, is een data gedreven, statistisch deel van het faalkansmodel opgesteld. Dit wordt toegelicht in hoofdstuk 5.



Figuur 2.1: Schematische weergave van de werking van het faalkansmodel; van inputdata tot faalkans met correlatiescore.

3 Input faalkansmodel

3.1 Algemene beschrijving invoergegevens

De invoergegevens voor het faalkansmodel zijn zowel gegevens die nodig zijn om de faalmechanismen te kunnen beschouwen als gegeven die nodig zijn om het leidinggedrag als gevolg van het optreden van deze faalmechanismen te kunnen bepalen. Het betreft fysieke leidinggegevens (ligging, materiaal, eigenschappen, typeverbindingen en typeaansluiting) en gegevens voor de faalmechanismen van de leiding (zetting, wanddikte afname, inwendige druk, verkeersbelasting en in het algemeen grond-leiding interactie). Een korte beschrijving van de invoergegevens is in tabel 3.1 opgenomen. De bronnen en de uitleg zijn in hoofdstuk 3.2 beschreven.

Tabel 3.1: Overzicht invoergegevens faalkansmodel met een korte beschrijving

Invoergegevens	Categorie	Beschrijving
Fysieke leidinggegevens	Ligging	Ligging leiding zowel verticaal (bovenaanzicht met RD-coördinaten) als horizontaal (in de langsrichting van de leiding)
	Materiaal Eigenschappen	Materiaal van de persleiding elementen (en of mantelbuis) Uitwendige diameter, wanddikte, elasticiteitsmodulus, dwars coëfficiënt, toelaatbare spanning
	Aansluiting Verbinding	Type verbinding: recht of bocht Type verbinding: las, mof-spie
Faalmechanisme	Zetting	Zettingen ter plaatse van leiding en zijn afhankelijk van de samendrukbaarheid van de ondergrond en belastingen op het maaiveld
	Inwendige druk	Druk in de leiding wordt berekend aan de hand van pomp karakteristieken en debiet die het pompsysteem in verschillende situaties verwerkt.
	Wanddikte afname	Wanddikte afname vindt bij veel leidingen plaats door twee oorzaken (H ₂ S aantasting* en uitloging**) en is afhankelijk van de inwendige druk, stromingssnelheid in de leiding en karakteristiek (en samenstelling) van het afvalwater.
	Verkeersbelasting en grond-leiding interactie	Grondmechanische parameters die bepalen hoe de leiding reageert op de belastingen rondom de leiding, zoals de verkeersbelasting.

*H₂S aantasting door gasophoping in de leiding.

**Uitloging door concentratie verschil tussen bepaalde mineralen in de leidingwand en in het afvalwater

3.2 Benodigde informatie voor invoergegevens

De benodigde informatie voor het compleet maken van de invoergegevens is in Tabel 3.2 opgenomen. Uitgangspunt is dat de meeste gegevens beschikbaar gesteld kunnen worden door de beheerders.

De fysieke leidinggegevens zijn normaliter beschikbaar in de aanlegtekeningen, routekaarten of inspectierapporten. Bij sommige leidingbeheerders is deze informatie digitaal beschikbaar (GIS, SQL of Oracle).

Voor de zettingsberekening is een zettingsmodel nodig. Het zettingsmodel bestaat uit de schematiseerde ondergrond, waterstanden en ophoginggeschiedenis. Daar is in de meeste gevallen gebruik gemaakt van de publieke grondonderzoekgegevens uit DINOloket (Data en Informatie van de Nederlandse Ondergrond). Aanvullend kunnen eventueel nog extra grondonderzoeken worden meegenomen.

Voor de inwendige druk is informatie over het leidingsysteemmodel nodig. Dit systeem bestaat uit de karakteristiek van een leiding systeem (pomp, reservoir, connecties). Bij een ontwerp van een persleiding wordt normaliter een leidingsysteem model gemaakt in de vorm van een WANDA file.

Voor de wanddikte afname berekening door uitloging speelt ook de samenstelling van het afvalwater een rol. In dit onderzoek is de invloed van de samenstelling van het afvalwater opgevraagd bij de leiding beheerders.

Het leidinggedrag wordt bepaald door de belastingen en de grond-leiding interactie (hoe de leiding op de belasting rondom de leiding reageert). De verkeersbelasting volgt uit de voorschriften volgens NEN 3650. De grondeigenschappen zoals sterkte en stijfheid van de verschillende grondlagen worden gebruikt om conform NEN 3650 de grondmechanische parameters voor de persleiding te berekenen.

Tabel 3.2: Bronnen en levering invoergegevens

Invoergegevens	Categorie	Benodigde informatie
Fysieke leidinggegevens	Ligging, materiaal, eigenschappen, aansluiting, verbinding	Aanlegtekening (as-built), routekaart, inspectie
Faalmechanisme	Zettingen Inwendige druk (leidingsysteemmodel) Wanddikte afname Verkeersbelasting en grond-leiding interactie	Geschematiseerde ondergrond, waterstanden en ophoginggeschiedenis, zie hoofdstuk 4.2. De ondergrond en waterstanden dienen op basis van grondonderzoek te worden geschematiseerd. Leidingsysteemmodel (met pompedrag, reservoir, connecties, leidingmateriaal) H ₂ S aantasting: inwendige druk, stromingssnelheid en ligging leiding uit de leidingsysteemberekening. Uitloging: inwendige druk, stromingssnelheid en ligging leiding uit de leidingsysteemberekening en ook samenstelling en karakteristiek van het afval water (zie hoofdstuk 4.5) Grondgegevens, sterkte en stijfheid en volume gewichten ter bepaling van de grondmechanische parameters: bedding constante (verticaal, horizontaal en axiaal). Verkeersweginfo voor de afleiding van de verkeersbelasting.

3.3 Inspectiedata en incidentendata

Bij de ontwikkeling van het faalkansmodel is gebruik gemaakt van inspectiedata per case om de gemodelleerde leidingveroudering te kunnen vergelijken met de in inspecties waargenomen condities. Dit is bijvoorbeeld de resterende wanddikte bij AC en beton en ovaliteit bij kunststof leidingen. Daarnaast is per case ook gebruik gemaakt van incidentendata, voor zover aanwezig, om de uitkomst van het faalkansmodel te verifiëren. Het is overigens ook mogelijk om de inspectiedata te gebruiken om de 'huidige situatie' als vertrekpunt mee te geven aan het faalkansmodel. Deze mogelijkheid is in dit project niet gebruikt, maar die biedt beheerders wel de mogelijkheid om inspecteren en berekenen van faalkansen te combineren.

4 Faalmechanismen

4.1 Keuze faalmechanismen

Voor de faalkansberekeningen zijn de meest relevante faalmechanismen van persleiding gekozen. De faalmechanismen zijn gerelateerd aan bepaalde fysische processen die voorkomen in de gebruiksfase van de leidingen. De fysische processen per faalmechanisme zijn in Tabel 4.1 beschreven.

Tabel 4.1: Faalmechanisme leiding gekoppeld aan het fysische proces

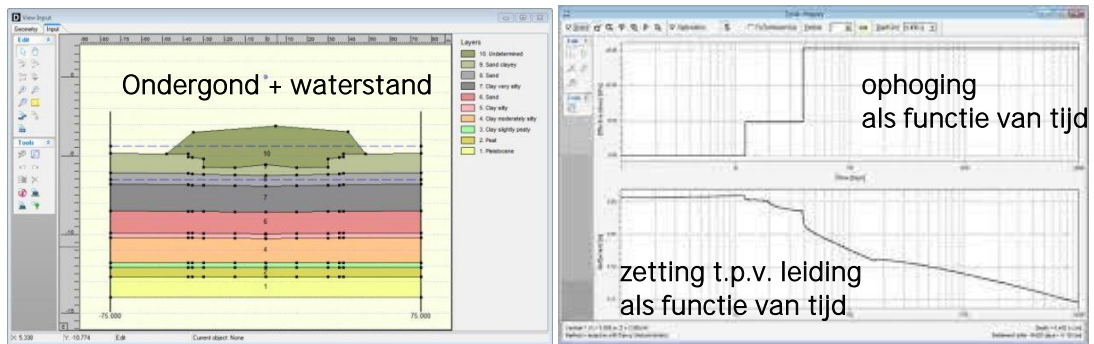
Faalmechanisme	Fysisch proces
Zetting van leiding	Zetting van ondergrond door bovenbelasting en door kruip
Druk in de leiding	Afwisseling van verschillende inwendige drukken in verschillende toestanden
Wanddikte afname	Door H ₂ S aantasting van de wand van de leiding neemt de dikte van wand af (door verschillende stromingssnelheden langs leidingbochten kan gasophoping plaatsvinden). Door uitloging lost er kalk op uit de wand van de leiding en neemt de wanddikte af.
Verkeersbelasting en Grond-leiding interactie	De belasting rondom de leiding wordt verhoogd door de aanwezigheid van verkeer. De overdracht van de belasting door de grond bepaalt het gedrag van de leiding.

4.2 Zettingen

4.2.1 Zettingsmodel

De zetting van de leiding is een fysisch proces dat door de samendrukbaarheid van de ondergrond wordt veroorzaakt. Hoe meer samendrukbaar de ondergrond hoe meer zetting op zal treden. Veenvormen of klei is meer samendrukbaar dan zand waardoor de aanwezigheid van veen of klei meer zetting kan veroorzaken. Ophoging op het maaiveld levert extra zetting van de grond rondom een persleiding op.

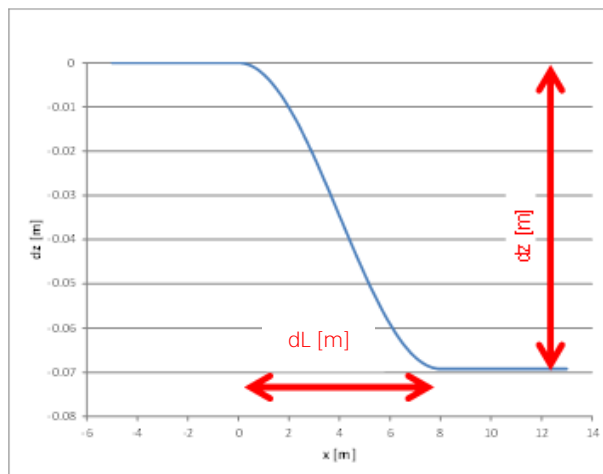
Het zettingsmodel om de zetting van de grond rondom de leiding uit te rekenen bestaat uit de geschematiseerde ondergrond met alle grondlagen en grondwaterstanden en in het verleden aangebrachte ophogingen. Figuur 4.1 laat een voorbeeld van een zettingsmodel zien van Deltares software D-Settlement, de software die voor dit onderzoek gebruikt is.



Figuur 4.1: Voorbeeld van een zettingsmodel met D-Settlement.

4.2.2 Zettingsverschil

Voor de faalkansberekening is zettingsverschil over een bepaalde afstand van belang voor het gedrag van de leiding (wanneer de leiding overall evenveel zakt levert de zetting geen extra spanning of vervorming op in de leiding). De lengte waarover een zettingsverschil optreedt (of zettingslengte) bepaalt de extra spanning of vervorming in de leiding (hoe kleiner de zettingslengte hoe groter de extra spanning of vervorming in de leiding). Voor de bepaling van de invloed van de zetting van de ondergrond op de leiding worden het zettingsverschil (dz) en zettingslengte (dL) berekend (zie Figuur 4.2).



Figuur 4.2: Zettingsverschil en zettingslengte op een leidingdeel.

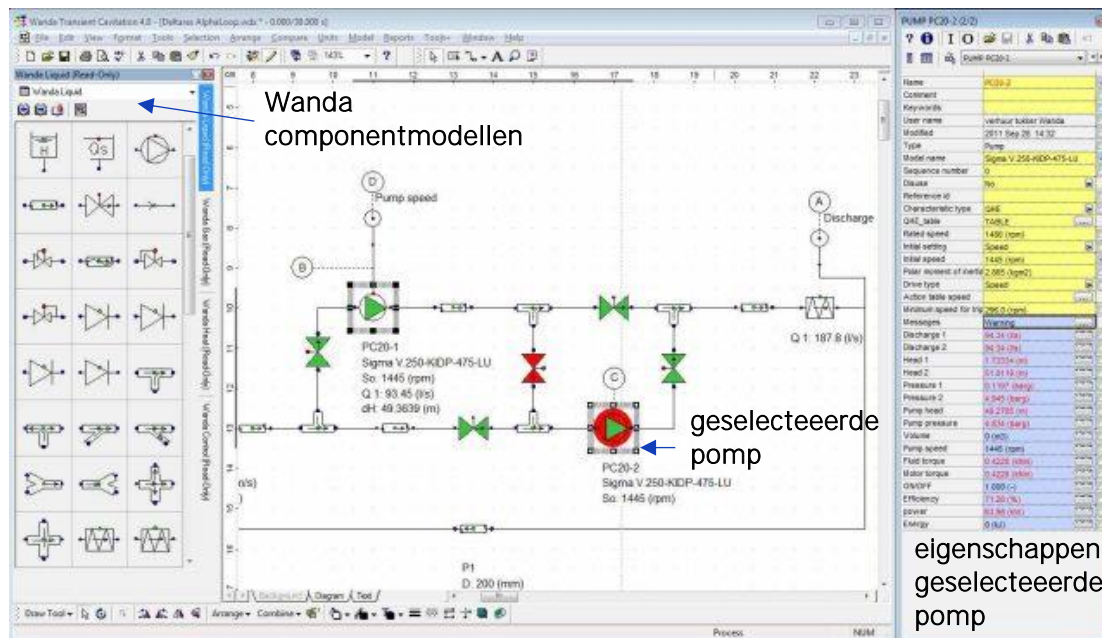
In het faalkansmodel zijn de zettingen berekend voor verschillende ondergrondschematiseringen die horen bij verschillende scenario's (zie voor toelichting van de scenario's paragraaf 6.2). De samendrukbaarheid van de verschillende grondlagen in de schematiseringen is bepaald conform EN 9997.

4.3 Inwendige druk

4.3.1 Leidingsysteemmodel

Inwendige druk (overdruk of onderdruk) in een leiding zoals een persleiding wordt bepaald door de aanwezige pomp(en). De inwendige druk is afhankelijk van de pompdruk, leiding geometrie (recht en bochten), verbindingen (bijvoorbeeld: T-stuk of Y-stuk) en leidingmateriaal (inwendige wrijving). Om de inwendige druk te kunnen berekenen is een

leidingsysteemmodel nodig. Figuur 4.3 laat een voorbeeld van een leidingsysteemmodel zien, gemaakt met de Deltares software Wanda, die voor dit onderzoek gebruikt is.



Figuur 4.3: Voorbeeld van een leidingsysteemmodel met Wanda.

4.3.2 Pomptoestanden voor inwendige druk

Voor het faalkansmodel is de druk in de leiding berekend voor 4 verschillende pomptoestanden: RWA, DWA, stilstaan, Pmin-trip. Een beschrijving van deze 4 situaties is in Tabel 4.2 opgenomen. In het faalkansmodel is een afzonderlijke kans van voorkomen toegekend aan iedere pomptoestand afhankelijk van de locatie.

Tabel 4.2: Beschrijving 4 verschillende situaties voor de inwendige druk

Pomptoestand	Beschrijving pomptoestand
RWA* (regenweer afvoer)	Pomp levert de hoogste druk in de leiding (tijdens regenweer) voor afvoeren van afval water + regenwater.
DWA (droogweer afvoer)	Pomp levert de minimale druk in de leiding (tijdens droogweer) voor afvoeren van afval water (veel kleinere hoeveelheid afvalwater in de leiding dan RWA)
Stilstaan	Pomp is niet actief (uitval) tijdens normale omstandigheden anders dan RWA, het afvalwater is aanwezig in de leiding
Pmin-trip** (na RWA)	Pomp is niet actief (uitval) na RWA waardoor de grootste negatieve druk (onderdruk) ontstaat in de leiding

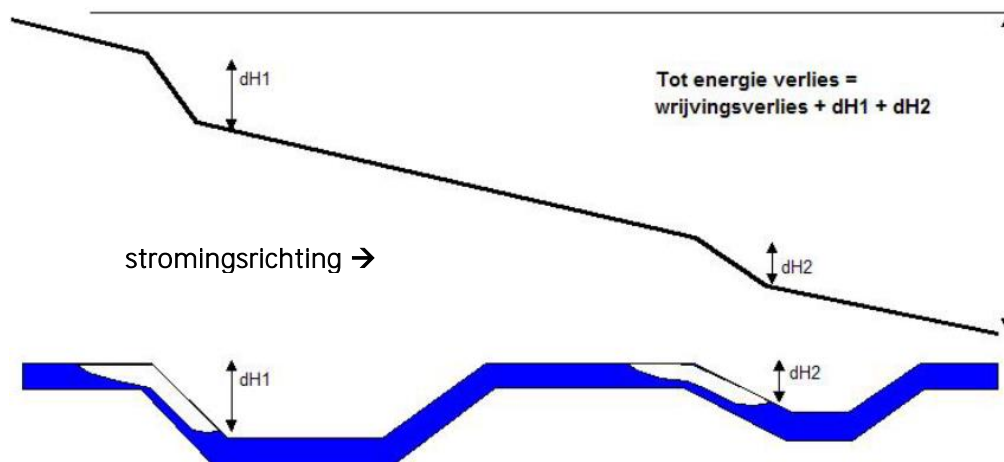
*Tijdens regenweer levert de pomp normaliter een hoge druk op in de leiding voor het afvoeren van het afval- en regenwater. RWA is een situatie waar de pomp draait op de maximale capaciteit waardoor de hoogste druk zal ontstaan in de leiding.

**Het uitvallen van een pompsysteem in een gesloten leidingsysteem na RWA situatie (van de hoogste druk naar stilstaan) waardoor de grootste negatieve druk (onderdruk) in de leiding zal ontstaan. Hoe lager de druk in de leiding voor het uitvallen van het pompsysteem, hoe lager de onderdruk.

4.4 Wanddikte afname door gasophoping

4.4.1 Locatie gasophoping

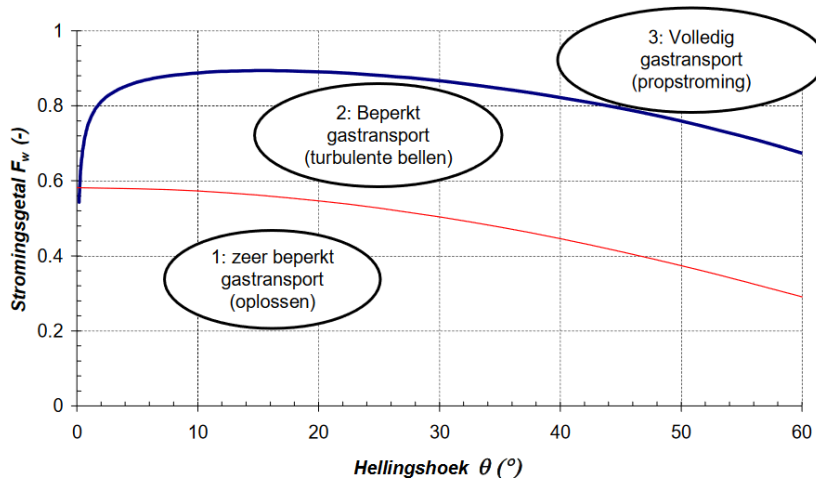
Ontwikkeling van H₂S gasbellen van het afvalwater in de leiding tast de leidingwand aan. Het gedrag van gasbellen in persleidingen hangt sterk af van de hoek van de neergaande buisdelen. Als gasbellen stagneren en ophopen in de leiding kan dat tot energieverliezen leiden en kan er ter plaatse van de gasophoping H₂S verzamelen dat de wand van de leiding kan aantasten (zie Figuur 4.4).



Figuur 4.4: Locatie gasophoping en energieverlies in de leiding (bron: CAPWAT 2012).

4.4.2 Hoeveelheid gasophoping

Om in een dalende leiding onder hoek θ een gastransport op gang te brengen is een zekere minimale snelheid vereist. Als de snelheid kleiner is dan deze minimumsnelheid, dan zal het gas zich in de leiding ophopen totdat de bel onderin de dalende leiding reikt. De benodigde stroomsnelheid is echter ook sterk afhankelijk van de leidingdiameter (zie Figuur 4.5). Bij een hoge waarde van het stromingsgetal (hoge F_w) is de kans voor gasophoping groter.



Figuur 4.5: Hoeveelheid gasophoping als functie van stromingsgetal (bron: CAPWAT 2012).

Voor hoeken groter dan 60° spelen andere fysische processen een dominante rol. De gasbellen worden dan gemakkelijker getransporteerd en zullen niet op dezelfde plek blijven.

4.4.3 Wanddikte afname bij 100% gasophoping voor verschillende leidingmaterialen

Biogene Zwavelzuur Aantasting (BZA) is een beruchte vorm van cement aantasting bij AC of betonnen leiding. Wanneer in het afvalwater H₂S gevormd wordt, kan dit geoxideerd worden in aanwezigheid van zuurstof. Dit gebeurt meestal bovenin de buis. Bij dit proces ontstaat zwavelzuur, wat de cement aantast. Dit is een lokaal en agressief mechanisme.

In het faalkansmodel wordt de wanddikte afname door H₂S aantasting gerelateerd aan de hoeveelheid gasophoping en het soort leidingmateriaal. De hoeveelheid gasophoping is afhankelijk van het stromingsgetal (afgeleid uit de stromingssnelheid van het leidingsysteemmodel). De wanddikte afname snelheid is afhankelijk van het percentage gasophoping dat op een leiding locatie kan ontstaan. De wanddikte afname snelheden in het geval van 100% gasophoping voor de verschillende scenario's (zie voor toelichting scenario's paragraaf 6.2), zijn in Tabel 4.3 opgenomen. De lokaal optredende percentages worden berekend conform de aanpak beschreven in de vorige paragraaf.

Tabel 4.3: Wanddikte afname snelheid bij 100% gasophoping voor verschillende leidingmaterialen

Leidingmateriaal	Minimaal [mm/jaar]	Gemiddeld [mm/jaar]	Maximaal [mm/jaar]
AC	0,05	0,15	0,30
HDPE, PVC	0		
Gietijzer, staal	0,02	0,06	0,12
Beton	0,04	0,12	0,24

4.5 Wanddikte afname door (interne) uitloging

Uitloging veroorzaakt een afname van wanddikte. De uitloging treedt op door concentratieverschil (van bepaalde mineralen) tussen de leidingwand en de vloeistof in de leiding. Hoe hoger het concentratieverschil hoe groter de wanddikte afname door uitloging. Voor het faalkansmodel is alleen interne uitloging beschouwd. Gezien externe uitloging meer complex is, gegeven afhankelijk van de fluctuatie van de grondwaterstanden en de mineralen in de ondergrond, en deze kennis nog deels ontwikkeld en geautomatiseerd moet worden, is vanwege haalbaarheid binnen de projectomvang gekozen in fase 2 alleen interne uitloging mee te nemen.

Voor een AC leiding of beton leiding is uitloging gerelateerd aan de LSI (Langelier Solubility Index). Deze index is afhankelijk van TDS (hoeveelheid opgeloste vastenstoffen in het afvalwater, in mg/L), temperatuur, alkaliniteit, calciumgehalte en pH. Bij een betonnen leiding speelt uitloging in mindere mate dan bij AC leiding hoewel het aantastingmechanisme hetzelfde is. Dit komt doordat betonnen leidingen over het algemeen een veel grotere wanddikte hebben.

Voor stalen en gietijzer leidingen is de uitloging gerelateerd aan de corrosie. De corrosiesnelheid bij een belucht water (afvalwater) is afhankelijk van een aantal factoren zoals alkaliniteit, pH, en opgeloste zuurstof in het afvalwater.

4.5.1 Wanddikte afname door interne uitlogging voor verschillende leidingmaterialen

De in het faalkansmodel meegenomen waarde voor de wanddikte afname snelheid door interne uitlogging voor verschillende leidingmaterialen, is weergegeven in Tabel 4.4. Uit recent onderzoek is gebleken dat de grootte van de uitlogingsnelheid berekend kan worden aan de hand van het debiet in de leiding, de TDS en de zuurgraad. Deze parameters zijn geclassificeerd en gekoppeld aan scenario's zodat er per scenario een wanddikte afname snelheid kan worden berekend weergegeven (zie voor toelichting scenario's paragraaf 6.2).

Tabel 4.4: Wanddikte afname snelheid door interne uitlogging

Leidingmateriaal	Minimaal* [mm/jaar]	Gemiddeld* [mm/jaar]	Maximaal* [mm/jaar]
AC	0,05	0,10	0,20
HDPE, PVC	0		
Gietijzer, staal	0,005	0,01	0,02
Beton	0,04	0,08	0,16

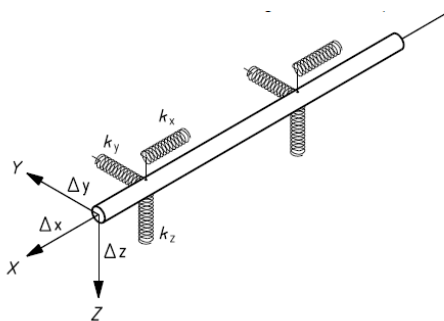
* TDS, pH, Q afhankelijk

4.6 Grond-leiding interactie

Normaliter wordt een leiding alleen belast door de omringende grond en door de inwendige druk in de leiding. Echter door een bovenbelasting als gevolg van verkeer boven de leiding kan deze belasting toenemen. De overdracht van de verkeersbelasting vanaf het maaiveld wordt doorgegeven door de grond. Daarbij is de relatieve beweging van de leiding ten opzichte van de grond van belang.

Relatieve beweging van de leiding ten opzichte van de omringende grond, bijvoorbeeld door grondzettingen, verzakkingen, thermische expansie of expansie door inwendige druk, wordt door de grond tegengewerkt. Dit leidt tot buigende momenten en krachten in de leiding of vervorming ter plaatse van de koppelingen. Om te toetsen of de leiding voldoende sterkte en stijfheid bezit om deze momenten en krachten te weerstaan, wordt (in een rekenmodel) een berekening van deze krachten en momenten, en daarmee samenhangende spanning, gemaakt.

Voor de berekening van de leiding in de grond kan de leiding worden voorgesteld als een staaf (ligger), ondersteund door veren in drie richtingen (k_x , k_y en k_z) die de grondreacties ($\Delta x \cdot k_x$, $\Delta y \cdot k_y$ en $\Delta z \cdot k_z$) in axiale, horizontale en verticale richting, zie Figuur 4.6.

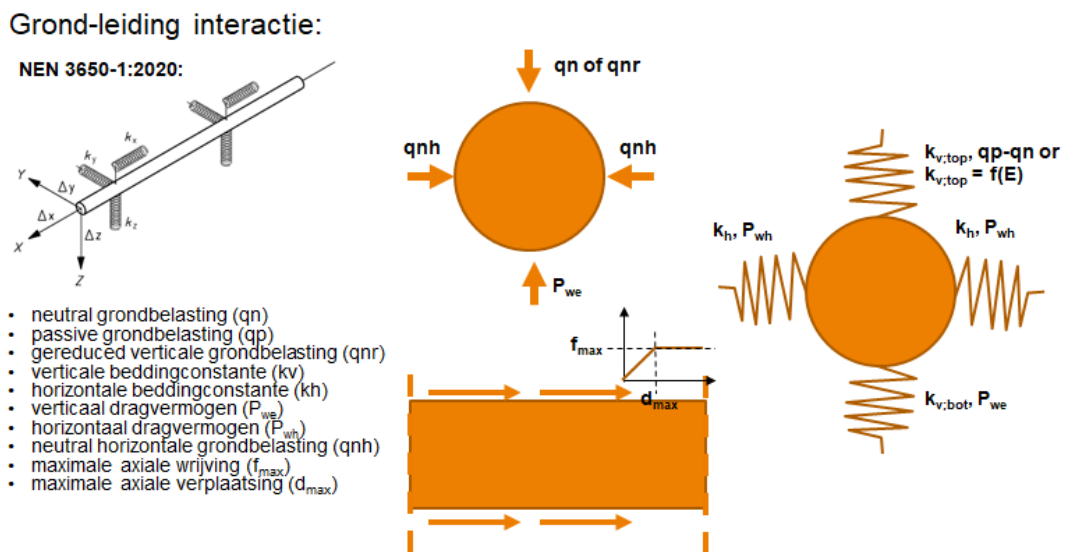


Figuur 4.6: Grondveren-leiding systeem voor een grond-leiding interactie model.

De grootte van de grondreacties zijn het gevolg van de relatieve verplaatsingen (Δx , Δy en Δz) van de buis ten opzichte van de omringende grond. De veren in de drie hoofdrichtingen schematiseren het grondgedrag. De karakteristiek van elk van deze veren bestaat uit een vervormingsafhankelijk deel en een (na bereiken van de uiterste waarde) constant deel; het ‘grensweerstandsvormogen’ (meestal ‘evenwicht draagvermogen’ genoemd) in de desbetreffende richting. De relatie tussen de relatieve verplaatsing en de grootte van de grondreactie in het vervormingsafhankelijke deel, wordt weergegeven door de ‘beddingconstante’. De parameters van de bilineaire grondveren (beddingconstanten, grensweerstandsvormogen) zijn berekend conform NEN3650.

4.6.1 Beddingconstanten en grondspanningen voor grond-leiding interactie

De in het faalkansmodel meegenomen belastingen op de leiding en de beddingconstanten ($k_{v,top}$, $k_{v,bot}$, k_h en f_{max}/d_{max}) zijn weergegeven in figuur 4.7. De maximale grondspanning van de horizontale beddingconstante (k_h) is het horizontaal draagvermogen van de grond (P_{wh}). De maximale grondspanning van de verticale beddingconstante opwaarts (k_{top}) is de passieve grondspanning (q_p). De maximale grondspanning van de verticale beddingconstante neerwaarts ($k_{v,bot}$) is het verticale draagvermogen van de ondergrond onder de leiding (P_{we}). De definities van verschillende spanningen zijn terug te vinden in NEN 3650. Voor het faalkansmodel zijn de beddingconstanten en grondspanningen berekend met Deltares software D-Geo Pipeline.



Figuur 4.7: Beddingconstanten en grondspanningen voor grond-leiding interactie.

4.7 Constructief gedrag

De zettingsverschillen, bovenbelasting en over- en onderdruk leiden tot vervormingen van en spanningen in de leiding. Om tot een faalkans te komen, dient daarom het constructieve gedrag van leiding en koppelingen bepaald te worden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van het door TNO ontwikkelde model Wtube. Dit is een op de eindige elementen methode gebaseerd model voor de modellering van het constructieve gedrag van ondergrondse leidingen.

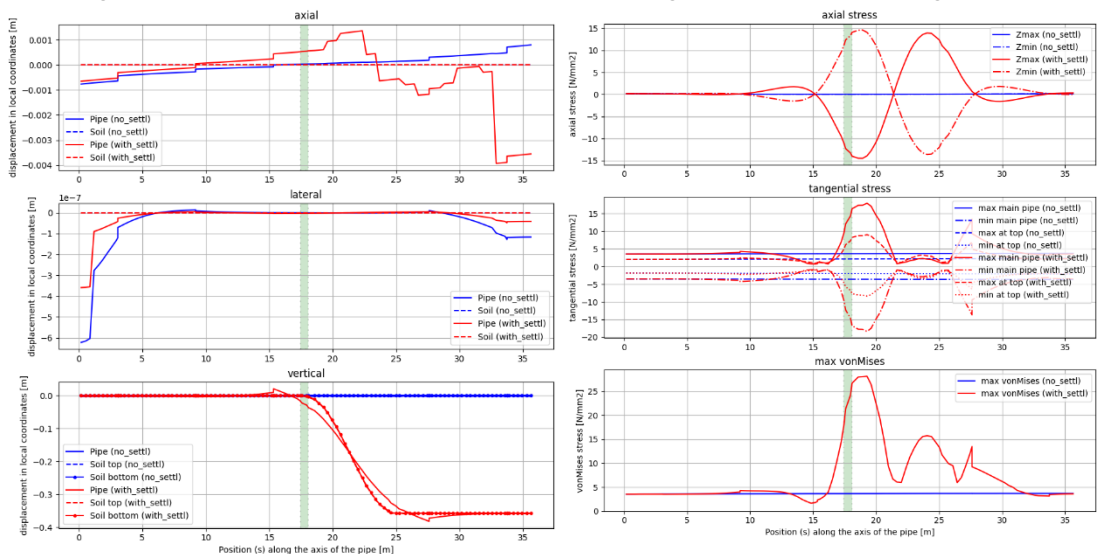
De input voor Wtube wordt gevormd door:

1. de resultaten van de deelmodellen zoals beschreven in paragraaf 4.2 t/m 4.6
2. de grond- en leidingeigenschappen inclusief koppelingen, zie tabel 4.5.

Tabel 4.5: Benodigde input parameters deelmodel constructief gedrag (Wtube)

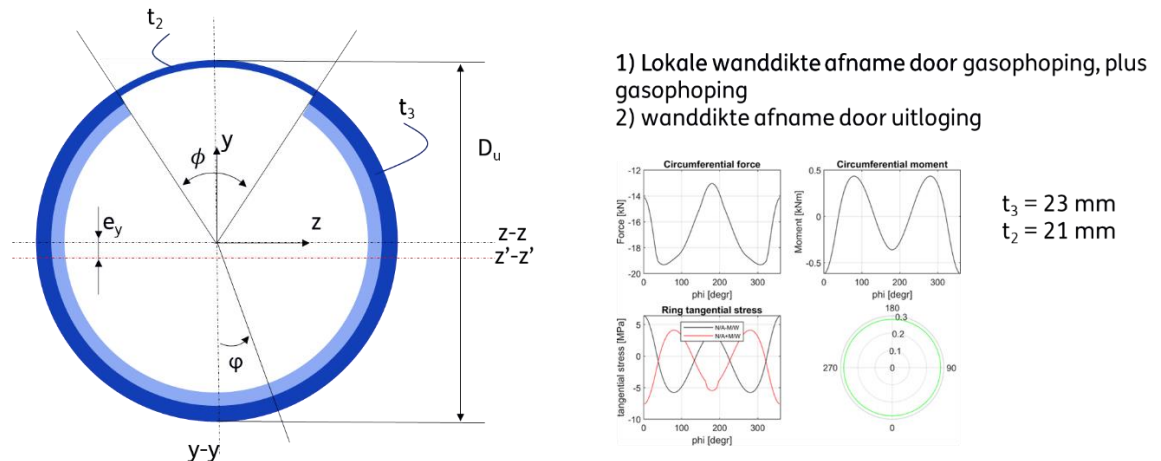
Type eigenschappen	Input Parameters WTube
<i>Belastingen</i>	inwendige druk zettingsverschillen (<i>volgt uit deelmodel zettingen</i>) eigen gewicht verkeersbelasting (via grondveren)
<i>Grondparameters</i>	eigenschappen grondveren (<i>volgt uit deelmodel zettingen</i>)
<i>Leidingeigenschappen</i>	diameter (uitwendig) wanddikte origineel wanddikte aangetast deel (<i>volgt uit deelmodel wanddikte afname</i>) wanddikte uitloging (<i>volgt uit deelmodel uitloging</i>) afschuifcoëfficiënt (<i>Timoshenko shear coefficient</i>) vulgraad dichtheid medium koppelingsstijfheden
<i>Materiaaleigenschappen</i>	E-modulus G-modulus dichtheid
<i>Ligging</i>	(x, y, z)-coördinaten
<i>Grondwaterniveau</i>	(x, y, z _w)-coördinaten, c.q. z _w -waarden in leiding liggingspunten

Als belasting effecten worden spanningen en vervormingen berekend. Voor de leidingen zijn het met name de spanningen die ten behoeve van het faalkans model worden bepaald: met name tangentiële, axiale spanningen en eventueel von Mises, zie figuur 4.8. Voor de koppelingen worden voor het faalkansmodel verplaatsingen en hoekverdraaiingen bepaald.



Figuur 4.8: Voorbeeld output door Wtube van een betonnen leiding.

In figuur 4.9 wordt een schematisering van de wanddikte afnames getoond. Ofschoon in de figuur niet op schaal, bedraagt de hoek waarover (aan de bovenzijde) de (H₂S) wanddikte afname wordt aangebracht 120°. De wanddikte afnames ten gevolge van gasophoping respectievelijk uitloging worden nergens bij elkaar opgeteld. Dus over 120° aan de bovenzijde vindt alleen H₂S aantasting plaats (waar van toepassing) en over het overige deel van de omtrek alleen aantasting door uitloging (waar van toepassing).



Figuur 4.9: Schematisering van de wanddikte afnames.

Onder andere ten behoeve van de validatie door middel van vergelijking met inspectie resultaten wordt door Wtube ook een maat voor de ovalisatie uitgerekend. Hierbij is gekozen voor de zogenaamde excentriciteit e (vanuit de meetkunde een kenmerkende eigenschap voor de beschrijving van een ellips):

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{r_{min}}{r_{max}}\right)^2}$$

De bovengrens voor r_{min} is r_{max} : de excentriciteit wordt 0 en de ellips wordt een cirkel.
 De ondergrens voor r_{min} is 0: de excentriciteit is 1 en de ellips heeft geen hoogte.

4.8 Verbindingen

Bij de inspectie van een rioolpersleiding is de staat van de buisverbindingen een belangrijk aandachtspunt bij alle materiaalsoorten. Kapotte buisverbindingen zorgen voor klein- en grootschalige lekkages. De staat van de verbindingen wordt in de praktijk visueel of met ultrasoon (PIG) beoordeeld door de horizontale hoekverdraaiing, de verticale hoekverdraaiing en de voegwijdte van de verbinding te inspecteren.

Deze paragraaf geeft een overzicht van informatie over buismaterialen, type verbindingen en toelaatbare hoekverdraaiing- en voegwijdte waarden en in de praktijk op basis van inspecties aangetroffen waarden.

4.8.1 Overzicht buismaterialen en type verbindingen

De meest gebruikte materialen voor rioolpersleidingen zijn:

- Asbestcement (AC) buizen worden gemaakt met een mengsel van 10-15% asbest en 70-80% cement en water. De asbestvezels worden omsloten door een cementlaag.
- Betonnen buizen, waarbij onderscheid gemaakt moet worden in ongewapend beton, gewapende beton, gewapende beton voorzien van een plaatstalen kern en voorgespannen beton.
- kunststof transportleidingen worden voornamelijk gemaakt met PVC, hoewel ook HDPE en GRE/GVK (glasvezelversterkte epoxy) wordt gebruikt.
- Gietijzer en staal worden meestal gebruikt voor het maken van hulpstukken

Figuur 4.10 geeft een overzicht volgens NEN 3218-1 van verbindingstypes en buismateriaal waarbij deze voorkomen. Er zijn meerdere opties voor de meeste materialen, met vaste of losse ring op een spie of in een mof. Bij een rolverbinding is er alleen een losse ring op een spie en bij een glijverbinding is er meestal een gefixeerde ring in een mof of een losse plaatsgebonden ring op een spie.

NEN 3218-1, tabel 1 — Verbindingstypes voorkomend bij diverse soorten buizen ¹⁾							
Materiaal van de buizen		Rolverbinding met losse ring op spie	Glijverbinding				Overige
			Met gefixeerde ring		Met losse, plaatsgebonden ring		
			Op spie	In mof	Op spie	In mof	
Beton	Ongewapend	X		X	X		X ³⁾
	Gewapend en met voorgespannen wapening	X		X	X		
	Met plaatstalen kern				X		X ^{2) 4) 5)}
Gres	Ø 100 mm t/m Ø 200 mm			X			
	Ø > 200 mm		X	X			
Gietijzer		X				X	X ^{2) 5) 6)}
Staal							X ^{2) 4) 5)}
Kunststof	Ongeplastificeerd PVC			X			X ^{2) 5)}
	PE			X			X ^{2) 4) 5)}
	Met glasvezel versterkt (GVK)	X		X	X		X ^{2) 5) 7)}
¹⁾ Voor bijzondere verbindingen, bijvoorbeeld met overgangstukken, raadpleeg de fabrikant. ²⁾ Trekvaste verbinding. ³⁾ Met vaar- en moereind. ⁴⁾ Lasverbinding. ⁵⁾ Flensverbinding. ⁶⁾ Met klemring of met aandrukking. ⁷⁾ Laminaatverbinding.							

Figuur 4.10: Overzicht van verbindingstypes per buismateriaal volgens NEN 3218-1.

Per leidingmateriaal is in de praktijk een aantal typen verbindingen beschikbaar. Dit betreft (tussen haakjes staat de bron/ buisfabrikant):

- Asbestcement (Eternit):
 - De verbinding tussen AC-buizen wordt uitgevoerd met komeetmoffen, terwijl AC verloop-, overgangs- en muurdoorvoermoffen ook andere koppelingsopties bieden.
- Ongewapend beton (Bonna Vianen):
 - Glijverbinding
 - Rolverbinding
- Gewapend betonnen buizen (Bonna Vianen):
 - Schuifverbinding
 - Konische lasverbinding (trekvast)
 - Konische lasverbinding in boorbuis (trekvast)
 - Strikverbinding
 - Johnsonkoppeling (trekvast)
 - Flensverbinding (trekvast)
- Kunststofbuizen (Dyka):
 - Druksteekmoffen bestemd voor PVC en HDPE persleidingen.
 - Trekvaste koppelingen, toe te passen bij bochten en zinkers in PVC persleidingen, of bij de overgang van kunststof naar gietijzeren hulpstukken.
 - Druklijmmoffen, toe te passen bij PVC drukleidingen.

Meer detailinformatie over verbindingen is opgenomen in bijlage B.

4.8.2 Toleranties buisverbindingen

Volgens NEN-EN 1610 + NEN 3218-1 wordt de toelaatbare hoekverdraaiing- en voegwijdte waarden aangegeven door de fabrikant. In de fabrieksdocumentatie staan montagerichtlijnen waarin de maximale vrije hoekverdraaiing meestal staat vermeld, maar de voegwijdte meestal niet.

De toelaatbare hoekverdraaiing van een buisverbinding is afhankelijk van de buisdiameter voor betonnen en AC transportleidingen. Tabel 4.6 geeft de hoekverdraaiingtoleranties aan voor de meest gebruikte buismaterialen. Hoe groter de diameter hoe kleiner de toelaatbare hoekverdraaiing. Voor pvc-buizen wordt echter één waarde (6°) gegeven voor alle beschikbare diameters. Bovendien geeft één fabrikant (Pipelife) aan dat slechts 3° per zijde van de buisverbinding wordt toegestaan. Volgens BureauLeiding is het echter bewezen dat verbindingstukken hun waterdichtheid behouden bij een hoekverdraaiing tot 2°.

Tabel 4.6: Toelaatbare hoekverdraaiing bij verbinding per buismateriaal

Diameter (mm)	Voorgespannen beton (Bonna Vianen)	Ongewapend beton (Arkel)	Gewapend beton (Arkel)	Asbestcement (Eternit)	PVC (Wavin en Pipelife)		
80				7°			
100				6,5°			
125				6°			
150				5,5°			
200				5°			
250				4,5°			
300				3°			
350				-			
400				3°		3°	3,5°
450				-		-	3°
500	2° 38' (2,63°)	1,5°	3°	3°	6° (max 3° per zijde)		
600	2° 14' (2,23°)	1,5°	1,5°	2,5°			
700	1° 57' (1,95°)	1,5°	1,5°	2,5°			
800	1° 43' (1,72°)	1,5°	1,5°	2,5°			
900	1° 33' (1,55°)	1°	1,5°	2°			
1000	1° 23' (1,38°)	1°	1°	2°			
1100	-	-	-	2°			
1200	1° 09' (1,15°)	-	-	1,5°			
1250	-	1°	1°	-			
1300	-	-	-	1,5°			
1400	1° 05' (1,08°)	-	-	1,5°			
1500	1° 15' (1,25°)	1°	1°	1°			
> 1500	-	-	-	-			

Tabel 4.7 geeft de toelaatbare voegwijdte waarden voor specifieke buisverbindingen. Geen fabrikant geeft echter gegevens over de maximale voegwijdte. Soms wordt de minimale voegwijdte gegeven, bijv. 10 mm bij rol- en glijverbindingen gemaakt van ongewapend beton. De waarden in tabel 4.7 zijn berekend op basis van de koppelingsafmetingen die gegeven worden in beschikbare handboeken. De maximale afstand tussen de uiteinden van twee buizen die nog in contact staan met de rubberafdichting wordt beschouwd als de toelaatbare voegwijdte. Bijvoorbeeld wordt de toelaatbare voegwijdte bij asbestcementkomeetmoffen berekend als $(LK-2 \cdot L5)$. Bovendien is het niet mogelijk om de voegwijdte voor alle materialen te vinden vanwege een tekort aan ontwerpdetails in fabrieksdocumentatie, bijv. geen volledige verbindingafmetingen.

Tabel 4.7: Toelaatbare voegwijdte bij verbinding per buismateriaal

Diameter (mm)	Voorgespannen beton (Bonna Vianen) strikverbinding	Asbestcement komeetmoffen (Eternit)	Asbestcement lange komeetmoffen (Eternit)	Overgang gietijzer naar asbestcement (Eternit)	Overgang PVC naar asbestcement (Eternit)
80	-	35	120	60	60
100		35	146	76	76
125		35	146	76	76
150		35	146	76	76
200		35	146	76	76
250		35	146	76	76
300	80 mm	35	146	76	76
350		35	170	90	92
400		35	170	90	90
450		35	170	90	90
500		35	170	90	90
600		11	198	114	111
700		11	198	-	-
800		11	254		
900		11	254		
1000		11	254		
1100		11	254		
1200		11	283		
> 1200		-	-		

4.8.3 Analyse van inspectiegegevens over verbindingen

De inspectiegegevens van 18 rioolpersleidingen zijn verkend om te controleren of de in de praktijk waargenomen hoekverdraaiing- en voegwijdte waarden binnen de theoretische toleranties blijven. Deze inspecties zijn uitgevoerd met de slimme PIG door Acquaint. Volgens opgave van Acquaint is de nauwkeurigheid van de hoekverdraaiing circa 1/8° en de nauwkeurigheid van de voegwijdte 2,5 mm bij een inspectiesnelheid van 0,2 m/s.

Figuren 4.11-4.13 geven de histogrammen weer van de verticale en horizontale hoekverdraaiing en de voegwijdte op rechte buisdelen van AC, PVC en gewapend beton. Bovendien wordt er voor de AC-leidingen onderscheid gemaakt tussen verschillende diameters als gevolg van de diameterafhankelijke toelaatbare waarden. Kritische hoekverdraaiing- en voegwijdte waarden zijn vaker waargenomen in trekvast verbindingsmoffen rondom bochten of materiaalovergangen. Het wordt aangenomen dat dit bij aanleg gebeurt om de buizen rondom een bocht goed op elkaar te verbinden. Dus de nadruk in deze figuren ligt op waarnemingen aan doorgaande rechte leidingen.

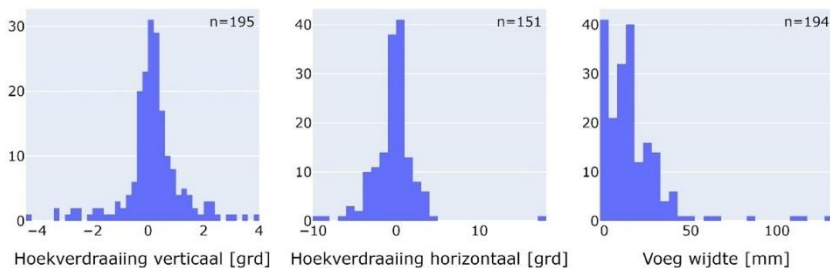
Het grootste deel van geïnspecteerde persleidingen is gemaakt van AC. Uit de analyse blijkt dat er voor kleine diameters (< 450 mm) een wijder hoekverdraaiingverdeling bestaat, deels door de grotere toelaatbare hoekverdraaiing en deels door de aangetroffen “uitschieters” (tot -21° horizontale hoekverdraaiing bij inwendige diameter van 450 mm). Grotere buisdiameters gaan vaak samen met grotere voegwijdtes. Het is trouwens niet duidelijk in

de inspectiedata of een komeetmof kort of lang is (zie bijlage A in 5.8). Als gevolg kan op basis van deze voegwijdte alleen niet worden beoordeeld of een AC verbinding in de praktijk kritiek is.

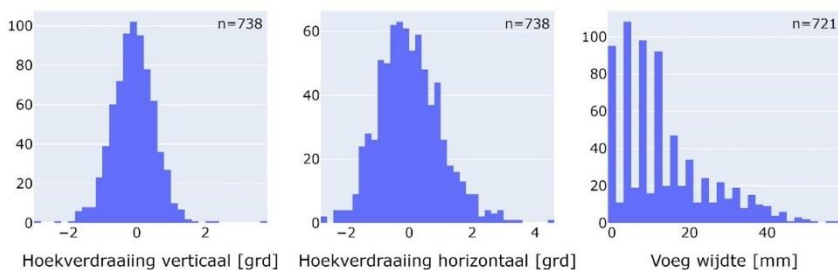
Wat de PVC-buizen betreft worden horizontale hoekverdraaiingen waargenomen tot drie keer boven de grenswaarde (17,84°), hoewel alle verticale hoekverdraaiingen minder dan de toelaatbare grens (6°) zijn. Bovendien zijn er enkele voegwijdtes groter dan 50mm die als uitschieters voorkomen. Het is echter onmogelijk om een kritische voegwijdte waarde vast te stellen vanwege de te weinig data.

Er zijn enkele kritische (vooral horizontale) hoekverdraaiingen bij verbindingen tussen gewapend betonnen buisdelen. De maximale waarde blijft lager dan 5°.

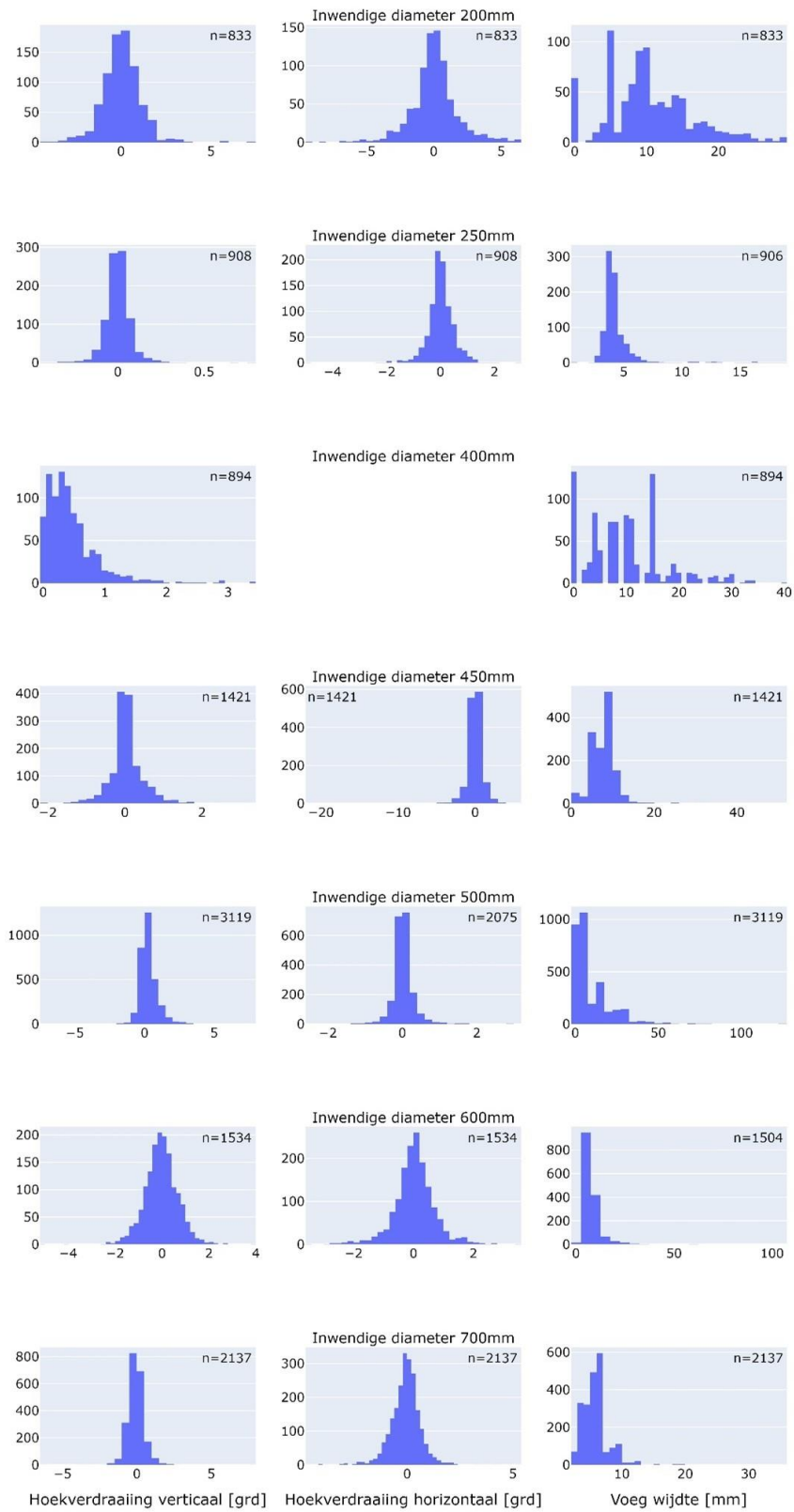
De uiteindelijk aangenomen waarden voor maximaal toelaatbare waarden van hoekverdraaiing van verbindingen zijn opgenomen in Bijlage A.2.



Figuur 4.11: Histogrammen voor PVC buisverbindingen: verticale hoekverdraaiing (links), horizontale hoekverdraaiing (midden) en voeg wijdte (rechts).



Figuur 4.12: Histogrammen voor verbindingen tussen gewapend betonbuizen (inwendige diameter 900 mm): verticale hoekverdraaiing (links), horizontale hoekverdraaiing (midden) en voeg wijdte (rechts).



Figuur 4.13: Histogrammen voor AC buisverbindingen ten opzichte van diameter: verticale hoekverdraaiing (eerste kolom), horizontale hoekverdraaiing (tweede kolom) en voeg wijdte (derde kolom).

4.9 Appendages

Persleidingen zijn op strategische plekken voorzien van ontluchters om luchtophoping te voorkomen. Luchtophoping kan niet alleen leiden tot een afname van de afvoercapaciteit, maar ook een rol spelen bij leidingaantasting. Naar schatting tellen Nederlandse afvalwaterpersleidingen in totaal meer dan 8000 ontluchters. Uit een recente enquête onder persleidingbeheerders blijkt dat het beheer van deze appendages per organisatie verschilt, zie ook Figuur 4.14. Zo inspecteert of reinigt ongeveer 35% van de gevraagde persleidingbeheerders ontluchters niet periodiek. Bij een kwart van de persleidingbeheerders is de locatie van de ontluchters niet precies bekend.



Figuur 4.14: Resultaten van een enquête onder persleidingbeheerders die tezamen meer dan eenderde van het totale persleidingenareaal beheren ($n=18$).

In incidentenregistraties komen ontluchters regelmatig terug als oorzaakobject bij faalgebeurtenissen. Soms is falen van operationele aard; ophoping van vet en ander vuil kan leiden tot een verstopping waardoor een ontluchter zijn functie verliest. Bij constructieve defecten speelt aantasting regelmatig een rol. Dat aantasting een relevant faalmechanisme voor ontluchters is, heeft mede te maken met de plaatsing van ontluchters op plekken waar luchtophoping wordt verwacht. Omdat constructief falen van ontluchters ook directe gevolgen kan hebben voor de algehele integriteit van een persleiding, zijn deze objecten ook opgenomen als onderdeel van het faalkansmodel persleidingen.

4.9.1 Gebruikte gegevens

Om een faalkans voor ontluchters af te leiden zijn naast historische incidentenoverzichten ook gegevens nodig over het aantal appendages en persleidinglengtes. Voor drie organisaties, die gezamenlijk 1200 kilometer persleiding beheren, waren deze gegevens beschikbaar. De belangrijkste kenmerken van de gebruikte datasets zijn in Tabel 4.8 opgenomen.

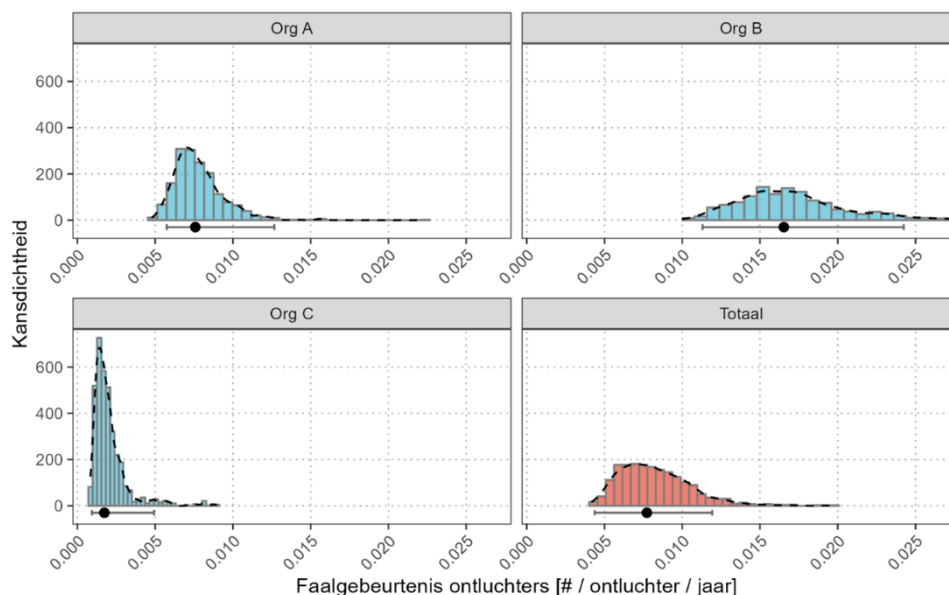
Tabel 4.8: Kenmerken van de gebruikte datasets

Organisatie	Persleidinglengte (km)	Aantal ontluchters	Faalgebeurtenissen	Periode
Org A	352	80	8	2004 – 2015
Org B	590	80	34	1991 – 2017
Org C	270	384	6	2009 - 2017

4.9.2 Afleiden van een faalkans voor ontlueters

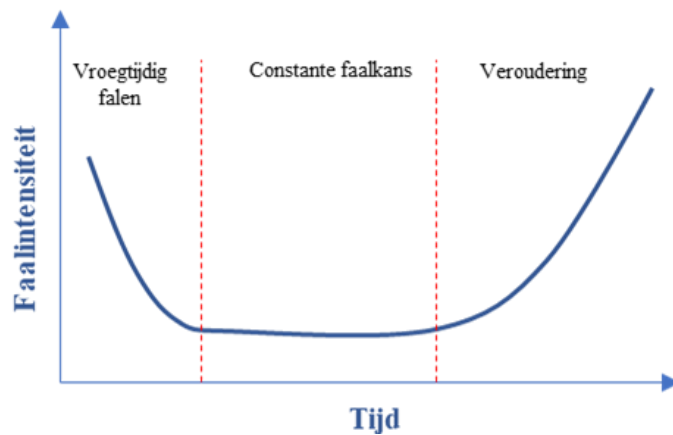
In totaal waren 48 constructieve faalgebeurtenissen beschikbaar om een faalkans uit af te leiden, zie ook Tabel 4.8. Dit aantal is vrij beperkt. Om toch een faalkans te kunnen bepalen inclusief bijbehorende onzekerheden is bootstrapping toegepast. Bij bootstrapping wordt meermaals een groot aantal willekeurige steekproeven van de data genomen. Elke steekproef is net iets anders en geeft daarmee een goed beeld van de natuurlijke variatie in een dataset.

Figuur 4.15 geeft het gemiddelde aantal faalgebeurtenissen per ontlueter per jaar voor de verschillende organisaties. Tussen de verschillende organisaties zijn substantiële verschillen te zien. Zo is het gemiddelde aantal faalgebeurtenissen voor Organisatie B bijna een factor tien groter dan het gemiddelde voor Organisatie C. Of dit te maken heeft met verschillen in de gekozen balans tussen actief en reactief beheer is niet bekend. Ook binnen de organisaties zelf is sprake van enige variatie in de tijdsduur tussen opeenvolgende faalgebeurtenissen, wat terug te zien is in de breedte van de betrouwbaarheidsintervallen voor het gemiddelde.



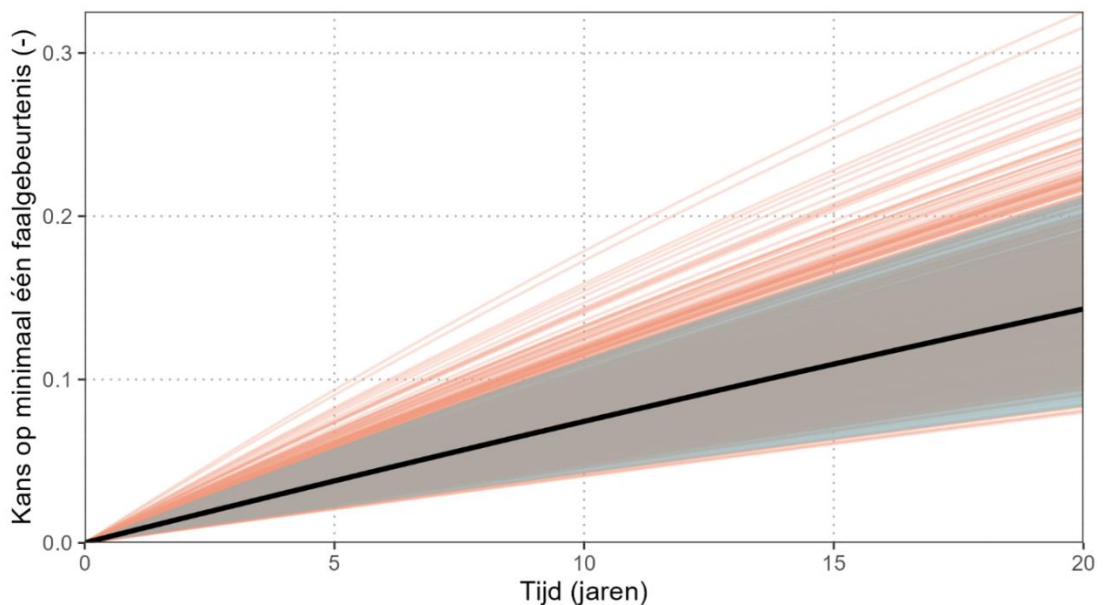
Figuur 4.15: Gemiddeld aantal faalgebeurtenissen per ontlueter per jaar. Het histogram geeft de bootstrapverdeling van het gemiddelde en de lijn eronder het 95% betrouwbaarheidsinterval (na correctie voor scheefheid en systematische afwijkingen).

Wanneer een constante faalkans wordt verondersteld en dus geen sprake is van noemenswaardige veroudering binnen een bepaalde tijdsperiode, ook wel het vlakke deel van de bekende badkuipkromme uit Figuur 4.16, is de faalkans exponentieel verdeeld en te beschrijven met de relatie $P[N(t) > 0] = 1 - e^{-\lambda t}$. Hierin is λ de faalintensiteit zoals gegeven in Figuur 4.16.



Figuur 4.16: Theoretisch verloop van de faalkans gedurende de technische levensduur van een object, met aanvankelijk een periode met kinderziekten door fouten tijdens ontwerp/ aanleg, met daarna een periode van normaal gebruik en veroudering aan het einde van de levensduur.

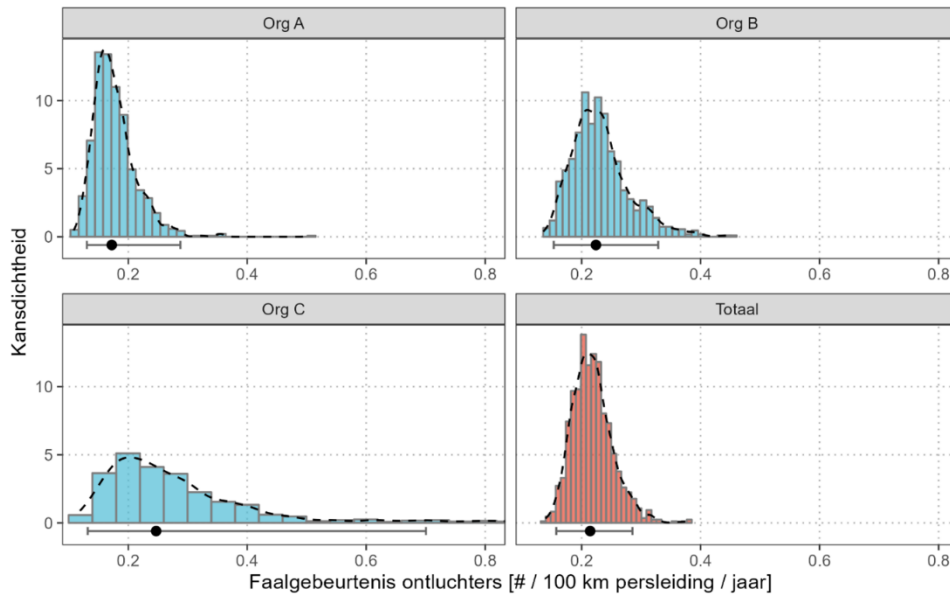
Het toepassen van deze formule met het totaal aantal faalgebeurtenissen uit Figuur 4.14, geeft het resultaat in Figuur 4.17. Uit deze figuur volgt dat de kans op minimaal één faalgebeurtenis in een tijdsbestek van 5 jaar is geschat op 0.04, oftewel 4%. Voor langere tijdsduren leidt het gebruik van een constante faalintensiteit tot een onderschatting van de daadwerkelijke faalkans, aangezien de ontluchter dan mogelijk al in het rechterdeel van de badkuipkromme terecht is gekomen waar de kans op een faalgebeurtenis stijgt naarmate het einde van de technische levensduur in zicht komt.



Figuur 4.17: Kans op minimaal één faalgebeurtenis als functie van de tijd (jaren). De verwachte faalkans is dor de zwarte lijn weergegeven en de zachtroze lijnen zijn de verschillende bootstrap steekproeven. De blauwe band geeft het 95% betrouwbaarheidsinterval.

Indien het onbekend is waar en hoeveel ontluchters zich in een persleidingtracé bevinden is het mogelijk de faalkans voor ontluchters uniform over de gehele persleiding te verdelen. Deze aanpak geniet niet de voorkeur aangezien daarmee onvoldoende recht wordt gedaan

aan de lokaal hogere faalkans op de locatie van een ontlufter, maar biedt wel de mogelijkheid voor de 25% van de beheerders die niet weet waar ontlufters zich bevinden om toch een gemiddelde faalkans mee te nemen.



Figuur 4.18: Gemiddeld aantal faalgebeurtenissen voor ontlufters per 100 km persleiding per jaar. Het histogram geeft de bootstrapverdeling van het gemiddelde en de lijn eronder het 95% betrouwbaarheidsinterval (na correctie voor scheefheid en systematische afwijkingen).

Het gemiddelde aantal faalgebeurtenissen per 100 km persleiding is in Figuur 4.18 weergegeven. Opvallend is dat de onderlinge verschillen tussen organisaties nu veel kleiner zijn dan bij Figuur 4.15. Zo schelen de geschatte gemiddeldes voor Organisatie C en Organisatie A slechts 31%. Hiermee vallen de organisaties ruim in elkaars 95% betrouwbaarheidsinterval.

De gemiddelde waarde van 0,215 faalgebeurtenissen per 100 km persleiding per jaar volgend uit Figuur 4.15, is meegenomen in het faalkansmodel.

5 Statistisch faalkansmodel

Graafschade en schade door derden is een veel voorkomende oorzaak van falen van persleidingen. In 2021 zijn 3.330 gevallen geregistreerd waarbij sprake was van graafschade aan persleidingen voor drinkwater of afvalwater (Ministry of Economic Affairs and Climate Policy 2022). Gemiddeld resulteert 5,62% van de graafbewegingen in graafschade. Aangezien het aantal graafbewegingen al jaren gestaag stijgt, van 470.000 in 2013 naar ruim 800.000 in 2021 is het niet ondenkbaar dat persleidingen in de nabije toekomst nog frequenter met graafschade te maken zullen hebben.

Modelmatig berekenen waar graafschade optreedt, veronderstelt dat gegevens over waar graafwerkzaamheden zullen worden uitgevoerd beschikbaar zijn voor de gehele levensduur van een leiding. Dit is uiteraard niet het geval, mede vanwege de lange levensduur van persleidingen. Wel is het mogelijk om met een statistisch model de kans op graafschade aan persleidingen te differentiëren naar inrichting en gebruik van de openbare ruimte. Dit hoofdstuk beschrijft de opzet van het statistische deelmodel dat falen door graafschade berekent.

5.1 Gebruikte gegevens

Omdat afvalwaterpersleidingbeheerders doorgaans tot enkele honderden kilometer persleiding in beheer hebben, is ook het aantal geregistreerde historische persleidingincidenten dat beschikbaar is om een statistisch model te trainen beperkt. Daarom is gekozen om incidentgegevens van drinkwaterbedrijven te gebruiken, die afhankelijk van de grootte soms wel 10.000km leiding beheren. Bijkomend voordeel is dat in de drinkwatersector al een aantal jaar geleden is gestart om incidenten, daar storingen genoemd, uniform te registreren in Ustore (zie www.kwrwater.nl/tools-producten/ustore/), met het doel om kennisopbouw over leidingfalen te faciliteren. Ongeveer 1/6 van de storingen wordt bij drinkwaterleidingen veroorzaakt door graafwerkzaamheden. Dit komt ongeveer overeen met 1 storing per 100km per jaar. Twee drinkwaterbedrijven hebben toestemming gegeven om hun areaaldata voor het ontwikkelen van een statistisch faalkansmodel te gebruiken. Tabel 5.1 geeft een aantal relevante kenmerken van de twee drinkwaterbedrijven waarvan zowel vaste leidinggegevens als incidentendata beschikbaar waren. De areaaldata zelf maakt geen onderdeel uit van het faalkansmodel. De areaaldata zijn alleen gebruikt om de relaties in het statistische model af te leiden.

Tabel 5.1: Kenmerken van de gebruikte datasets

Parameter	Leidinglengte (km)	Incidenten graafschade (-)	Periode (-)
PWN Waterleidingbedrijf Noord-Holland	9.873	999	2010 - 2016
Waterleiding Maatschappij Limburg	8.325	357	2010 - 2019
Totaal	18.198	1.356	-

De omgevingskenmerken in Tabel 5.2 komen in aanmerking om als onafhankelijke variabele in het model te worden opgenomen. Omgevingskenmerken zijn naar drie typen in te delen. Type I gaat over de inrichting van het bovenliggende maaiveld. Dit zegt iets over het landgebruik en de aanwezigheid van andere kabels en leidingen. Type II gaat over de bevolkingsdichtheid, want in stedelijk gebied zijn doorgaans meer bouwactiviteiten. Type III, tenslotte, gaat over bouwactiviteiten nabij leidingen.

Tabel 5.2: Omgevingskenmerken die in model zijn opgenomen om verschillen in de faalkans te verklaren

Onafhankelijke variabele	Type	Mogelijke waarden	Beschrijving
Type I. Inrichting bovengrond	Categorisch	Terreindeel_begroeid Terreindeel_onbegroeid Verharding_wegdeel Verharding_overig Anders	Inrichting van het maaiveld
Type II. Aantal inwoners	Numeriek	0 - ∞	In dichtbevolkte gebieden wordt de ondergrond intensiever gebruikt
Type II. Agrarisch gebied	Binair	Ja/Nee	In agrarische gebieden worden andere graafwerkzaamheden uitgevoerd, b.v. voor de aanleg van drainage
Type II. Woonkern	Binair	Ja/Nee	In dichtbevolkte gebieden wordt de ondergrond intensiever gebruikt
Type III. Inbreiding nabij	Binair	Ja/Nee	Wanneer een inbreidingsproject is gepland kan in de nabijheid meer grondbewegingen worden verwacht die tot graafschade kunnen leiden

5.2 Modelleren van incidenten door graafschade

Incidenten door graafschade zijn gekoppeld aan het dichtstbijzijnde leidingsegment. Vervolgens is per leidingsegment het aantal incidenten geïnventariseerd. Dit geeft een dataset waarvan het aantal rijen gelijk is aan het aantal leidingen in het beheergebied.

Veelal wordt Poisson-regressie gebruikt om data over aantallen te modelleren. Poisson-regressie is vergelijkbaar met lineaire regressie maar veronderstelt dat de afhankelijke variabele, in dit geval het aantal incidenten, discreet en positief is. De Poisson verdeling veronderstelt dat de variantie en het gemiddelde gelijk zijn, een aanname die in veel praktische datasets niet houdt. Een goed alternatief is dan de Negatief Binomiale verdeling, die voorzien is van een dispersie parameter die deze aanname versoepelt.

Omdat niet elk leidingsegment dezelfde lengte heeft, geeft het rechtstreeks modelleren van incidentaantallen per leiding een vertekend beeld. Per slot van rekening ligt het in de lijn der verwachting dat een langere leiding een grotere kans op graafschade kent. Een betere benadering is om het aantal incidenten per eenheid van leidinglengte te beschouwen. Dit kan door de leidinglengte als ‘offset’ toe te voegen.

Uit Tabel 5.1 volgt al dat de verhouding tussen de aantallen graafschade incidenten en het aantal kilometer leiding klein is, oftewel bij verreweg de meeste leidingen zijn geen

graafschadeincidenten opgetreden. Omdat regressiemodellen doorgaans slecht overweg kunnen met overmatig veel ‘nullen’, is gekozen voor een tweedelig model waarbij een binomiaal regressie deel is toegevoegd om de kans dat bij een leiding geen incident is opgetreden te modelleren. De verdelingsfunctie wordt dan gegeven door:

$$f(y_i = 0) = \pi_i + (1 - \pi_i) \left(\frac{k}{\mu_i+k}\right)^k \tag{5.1}$$

$$f(y_i, y_i > 0) = (1 - \pi_i) \frac{\Gamma(y_i+k)}{\Gamma(k)\Gamma(y_i+1)} \left(\frac{k}{\mu_i+k}\right)^k \left(1 - \frac{k}{\mu_i+k}\right)^{y_i} \tag{5.2}$$

Waar i het incidentnummer is,

$$\mu_i = e^{\beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \dots + \beta_n x_{n,i} + V_i} \tag{5.3}$$

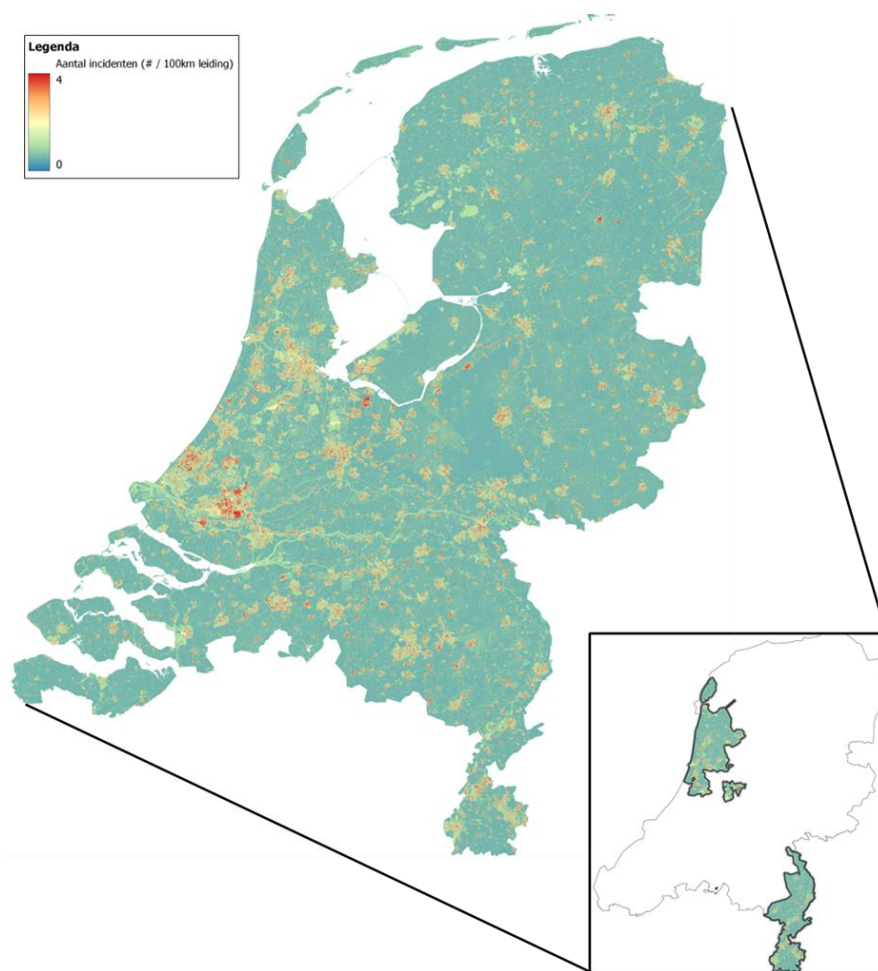
de onafhankelijke variabelen x bevat met gewichten β en offset V , k de dispersie parameter is en

$$\pi_i = \frac{e^{\gamma_0 + \gamma_1 x_{1,i} + \dots + \gamma_n x_{n,i} + V_i}}{1 + e^{\gamma_0 + \gamma_1 x_{1,i} + \dots + \gamma_n x_{n,i} + V_i}} \tag{5.4}$$

5.3 Resultaten

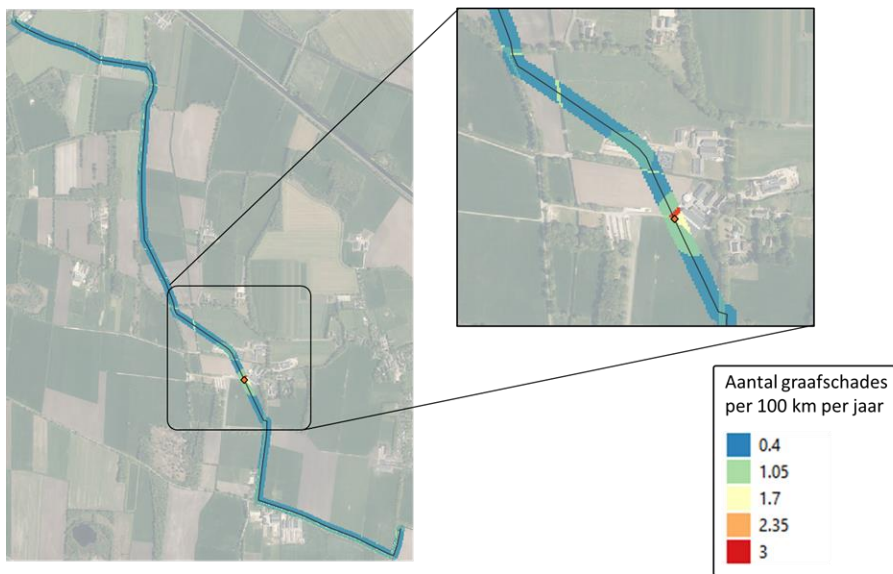
Het doorlopen van de modelleringsprocedure geeft veel informatie over welke variabelen relevant zijn en welke onderling gecorreleerd zijn en dus geen extra informatie geven over de kans op graafschade. De uiteindelijke modelstructuur bevat de modelparameters ‘Inrichting bovengrond’, ‘Aantal inwoners’, ‘Woonkern’ en ‘Inbreiding nabij’ uit Tabel 5.2. Dat ‘Agrarisch gebied’ onvoldoende onderscheidend is hangt waarschijnlijk samen met het feit dat het aandeel drinkwaterleidingen in agrarisch gebied nagenoeg verwaarloosbaar is.

Gegevens over de modelvariabelen zijn beschikbaar voor heel Nederland waardoor het eenvoudig is het resulterende model op heel Nederland toe te passen, zie ook Figuur 5.1. Bij het extrapoleren naar andere beheergebieden kan de grootte van de werkelijke graafschadekans afwijken aangezien geen rekening is gehouden met verschillen in de beheerfilosofie. Zo kan de graafschadekans in de praktijk lager uitvallen wanneer de lokale beheerder bovenop KLIC meldingen zit omdat het de ambitie is om aantallen graafschades te reduceren.



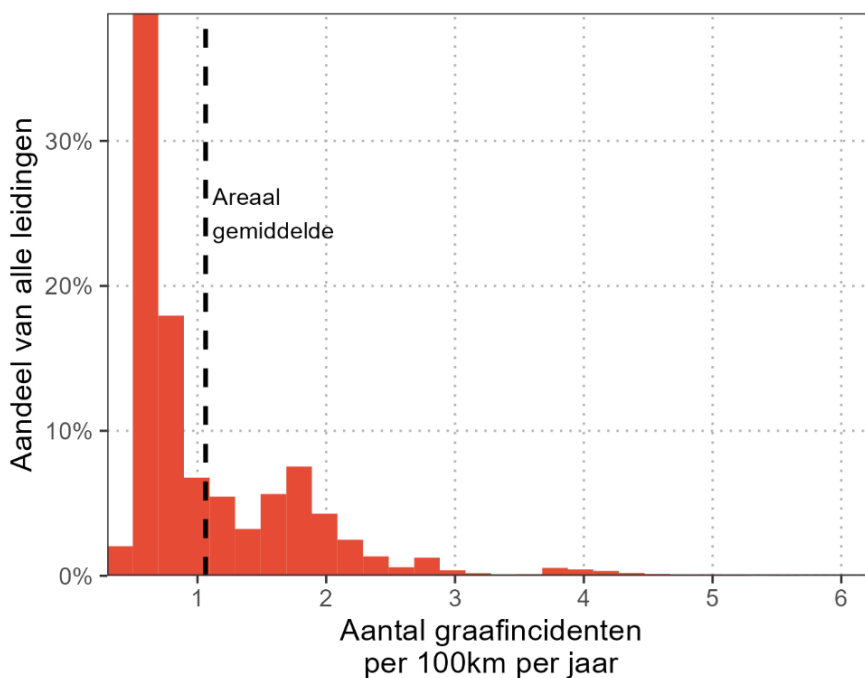
Figuur 5.1: Modelresultaat o.b.v. gegevens twee drinkwaterbedrijven geëxtrapolleerd voor geheel Nederland.

Figuur 5.1 toont de faalkans door graafschade voor een ondergrondse leiding, zoals afvalwaterpersleiding of drinkwaterleiding, op een 4m *4m grid. Door de ligging van een specifieke leiding te leggen onder deze kaart is het mogelijk om per leiding de faalkans door graafwerkzaamheden te bepalen. Een voorbeeld daarvan is opgenomen in Figuur 5.2, voor de afvalwaterpersleiding Diever van WDOD. Deze figuur toont de kans op graafschade, die duidelijk afhankelijk is van de ligging van de persleiding. 'Toevallig' heeft op het punt met de hoogst berekende kans op graafschade ook daadwerkelijk een incident plaatsgevonden. De incidentendatabase schrijft hierover: *'leiding door drainage werkzaamheden kapot. Hersteld met 5 meter PVC en 2 druksteekmof overschuif.'*



Figuur 5.2: Modelresultaat WDOD afvalwaterpersleiding Diever. De kleuren geven de kans aan op graafschade uitgedrukt in aantallen per 100 km/jaar. De oranje stip geeft de locatie aan van een graafschade incident.

Figuur 5.3 toont dat gebruik van een uniforme faalkans voor graafschade binnen asset management in meeste gevallen leidt tot een verkeerde inschatting van de risico's. Zo kennen meeste leidingen in de dataset een lage faalkans van ongeveer 0,5 graafschadeincidenten per 100km per jaar, maar dit kan oplopen tot boven de 2 graafschadeincidenten per 100km per jaar in dichtbevolkte gebieden met bouwactiviteiten. Het areaalgemiddelde van 1 graafschadeincident per 100km per jaar is derhalve geen goede indicator voor de faalkans.



Figuur 5.3: Spreiding in het aantal graafschadeincidenten. De stippellijn geeft het areaalgemiddelde weer.

Het is mogelijk om de faalkans door graafschade te differentiëren op basis van omgevingskenmerken die iets zeggen over de inrichting en het gebruik van de openbare ruimte. Het verwachte aantal graafschadeincidenten kan afhankelijk van de ligging van een persleiding meer dan een factor vier verschillen. Dit betekent dat het verwaarlozen van de faalkans door graafschade, of aannemen dat deze overal binnen het beheergebied gelijk is, kan leiden tot een verkeerde inschatting van de risico's. Met het afgeleide model kunnen beheerders in Nederland snel inzicht krijgen in ruimtelijke verschillen in de faalkans door graafschade.

Op areaalniveau zou het model nog verder verfijnd kunnen worden door gegevens over graafbewegingen, bijvoorbeeld in de vorm van KLIC meldingen, toe te voegen. Dit is vooral interessant voor drinkwaterbedrijven die veel leidingen beheren en dus voldoende historische faalgebeurtenissen hebben geregistreerd om een dergelijk model te trainen.

6 Faalkansmodel

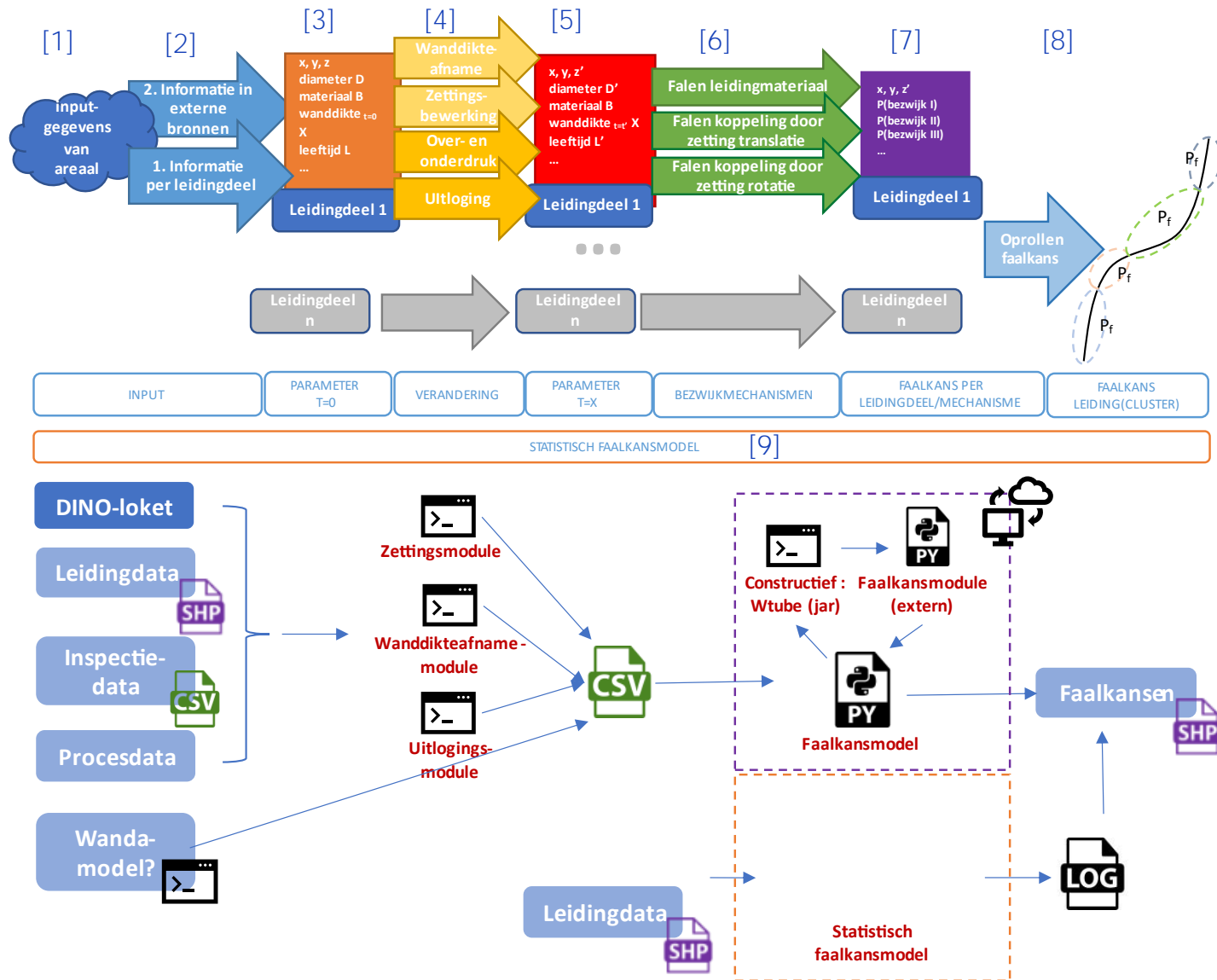
6.1 Dataflow faalkansmodel

Ten behoeve van het realiseren van een kwantitatieve methode voor de betrouwbaarheidsbepaling (faalkansmodel) van persleidingen in het areaal van de beheerder, waarin de complexe interacties tussen de verschillende deelmodellen is geborgd, is in dit project gebruik gemaakt van beschikbare probabilistische technieken. Om tot een faalkans voor de persleidingen te komen, worden binnen het faalkansmodel verschillende databronnen en deelmodellen gekoppeld om beschikbare data en kennis optimaal te benutten, zoals ook beschreven is in hoofdstuk 2. Welke data en waar deze gekoppeld wordt, is schematisch weergegeven in de dataflow in figuur 6.1.

De stappen in de linkerhelft van deze dataflow zijn reeds beschreven. De leiding- en procesdata die als input dienen voor dit faalkansmodel, zijn beschreven in hoofdstuk 3 ([1] in figuur 2.1 en figuur 6.1). De deelmodules voor zettingen, wanddikteafname en uitlogging in deze dataflow zijn beschreven in hoofdstuk 4 ([4] – [5] in figuur 2.1 en figuur 6.1). Ook de module voor het bepalen van het constructief gedrag van de leiding is in hoofdstuk 4 beschreven ([6] in figuur 2.1 en figuur 6.1). Het statistisch faalkansmodel voor de faalkans voor niet fysisch gemodelleerde faalmechanismen is beschreven in hoofdstuk 5 ([9] in figuur 2.1 en figuur 6.1). De stappen in de rechterhelft van deze dataflow die betrekking hebben op de faalkansberekening (paarse kader in figuur 6.1), komen in dit hoofdstuk aan bod ([7] en [8] in figuur 2.1 en figuur 6.1).

In de module faalkansberekening worden per leidingdeel (waarvoor de relevante eigenschappen constant zijn) en per bezwijkmechanisme (manier van constructief falen van de leiding zelf; het leidingmateriaal of de verbindingen) faalkansen bepaald. De hiervoor gebruikte methodiek wordt beschreven in paragraaf 6.2. De faalkansen voor deze individuele leidingdelen en per bezwijkmechanisme worden vervolgens gecombineerd (oprollen) tot totale faalkansen per leiding. Dit wordt beschreven in paragraaf 6.3. In paragraaf 6.4 is uiteengezet welke output volgt uit het faalkansmodel en in welke vorm dit beschikbaar is.

Stappen [1] tot en met [5] resulteren in een gecombineerd bestand (csv) per leiding (casus) die dient als input voor het faalkansmodel. Het faalkansmodel (Python) bepaalt op basis van deze invoer de benodigde opsplitsing naar berekeningen per leidingdeel en faalmechaniemescenario (combinatie zetting, wanddikteafname, druk en uitlogging). Vervolgens wordt per berekening de module constructief gedrag uitgevoerd waarna op basis van de gevonden spanningen in en vervormingen van de leiding de faalkans wordt bepaald. Door de opsplitsing naar leidingdelen (typisch één tot enkele meters) en faalmechaniemescenario's worden dit zeer veel berekeningen. Daarom is het faalkansmodel zo opgezet dat deze berekeningen parallel in de cloud uitgevoerd kunnen worden. Dit resulteert in een significante versnelling van de berekeningen (totaal één tot twee uur per leiding van enkele kilometers). De resulterende faalkansen komen weer terug bij het overkoepelende faalkansmodel om uiteindelijk opgerold te worden tot faalkansen per leiding(cluster). Het (probabilistisch) faalkansmodel integreert hierbij ook de resultaten uit het statistisch faalkansmodel.



Figuur 6.1: Dataflow faalkansmodel.

6.2 Faalkansberekening

Constructief falen van de leiding kan op meerdere manieren plaatsvinden. In het faalkansmodel wordt de faalkans van de leiding berekend voor alle relevante bezwijkmechanismen per type leiding (materiaal en koppeling). De maatgevende toetsing bepaalt uiteindelijk de faalkans van de leiding. Zoals beschreven in [1] kan de leiding op twee manieren falen: het leidingmateriaal zelf kan falen doordat de toegestane spanningen worden overschreden of de koppelingen tussen leidingsegmenten kunnen falen doordat de toegestane hoekverdraaiing of verplaatsing wordt overschreden. Ook falen van het leidingmateriaal zelf kan op meerdere manieren gebeuren. In onderstaand overzicht (tabel 6.1) zijn te toetsen bezwijkmechanismen door het faalkansmodel per materiaal en type koppeling weergegeven.

Tabel 6.1: Te toetsen bezwijkmechanismen door het faalkansmodel per leidingmateriaal en type koppeling

Materiaal	Bezwijkmechanismen leidingmateriaal	Type koppeling	Bezwijkmechanismen koppeling
Staal	Von Mises spanningen	Mof-spie	Geen (trekvast)
		Flens	Geen (trekvast)
		Las	Geen (trekvast)
		Trekvast	Geen (trekvast)
		Vaar-moer	Geen (trekvast)
Gietijzer	Von Mises spanningen	Mof-spie	Geen (trekvast)
		Flens	Geen (trekvast)
		Trekvast	Geen (trekvast)
		Vaar-moer	Hoekverdraaiing en verplaatsing
Asbestcement	Axiale en tangentiële spanningen	Mof-spie	Hoekverdraaiing en verplaatsing
		Flens	Geen (trekvast)
Beton	Radiale en tangentiële spanningen	Mof-spie	Hoekverdraaiing en verplaatsing
		Vaar-moer	Hoekverdraaiing en verplaatsing
HDPE	Axiale en tangentiële spanningen	Mof-spie	Hoekverdraaiing (en verplaatsing)
		Flens	Geen (trekvast)
		Lijm	Geen (trekvast)
PVC	Axiale en tangentiële spanningen	Mof-spie	Hoekverdraaiing (en verplaatsing)
		Flens	Geen (trekvast)
		Lijm	Geen (trekvast)
		Vaar-moer	Hoekverdraaiing (en verplaatsing)

Voor elk van deze bezwijkmechanismen is een zogenoemde grenstoestandsfunctie Z opgesteld. De grenstoestandsfunctie bevat zowel termen die de belasting(effecten) in de leiding als de weerstand van de leiding beschrijven. De belasting(effecten) in de leiding zijn de spanningen die volgen uit het deelmodel constructief gedrag (paragraaf 4.7).

Alle faalmechanisme deelmodellen (zettingen, wanddikteafname, over- en onderdruk en uitloging uit paragraaf 4.2 t/m 4.6) en bijbehorende invoerwaarden zijn onzeker en worden daarom als discrete kansverdelingen gerepresenteerd; een drie- of viertal scenario's per mechanisme (bijvoorbeeld laag, middel, hoog) met elk hun eigen kans van voorkomen. Deze scenario's worden vervolgens onderling gecombineerd binnen het faalkansmodel waardoor scenariocombinaties ontstaan (combinatie van een waarde voor de zetting, wanddikteafname, druk en uitloging). Elk van deze scenariocombinaties, ofwel invoercombinaties, wordt voor elk leidingdeel doorgerekend met het faalkansmodel. Met drie scenario's voor zettingen, drie voor wanddikteafname, vier voor over- en onderdruk en drie voor uitloging levert dit $3 \times 3 \times 4 \times 3 = 108$ invoercombinaties per leidingdeel voor het deelmodel constructief gedrag. Dit resulteert dus ook in 108 realisaties van spanningen in de leiding en vervormingen van de leiding en zijn verbindingen voor elk leidingdeel.

Omdat er gebruik gemaakt wordt van discrete kansverdelingen is om tot een faalkans te komen en om de onzekerheden in de modellering te ondervangen, een modelfactor gedefinieerd. Deze beschrijft de modelonzekerheid van het gehele faalkansmodel. De gehanteerde grenstoestandsfuncties voor falen van het leidingmateriaal zelf en falen van de verbinding zijn iets anders van opzet.

De grenstoestandsfunctie die wordt gebruikt voor de faalkansberekening van het leidingmateriaal zelf is als volgt:

$$Z = R - m_S \cdot S \tag{6.1}$$

Met:

- R De weerstand van het leidingmateriaal
- S Het belastingeffect volgend uit het deelmodel constructief gedrag
- m_S Modelonzekerheid faalkansmodel

De grenstoestandsfunctie die wordt gebruikt voor de faalkansberekening van de verbindingen is als volgt:

$$Z = R - (m_{S,0}S_0 + m_{S,1}S_1) \tag{6.2}$$

Met:

- R De toegestane waarde voor de verplaatsing of hoekverdraaiing
- S_0 Initiële verplaatsing of hoekverdraaiing
- S_1 Additionele verplaatsing of hoekverdraaiing door zettingen en drukverschillen
- $m_{S,0}$ Modelonzekerheid initiële verplaatsing of hoekverdraaiing
- $m_{S,1}$ Modelonzekerheid additionele verplaatsing of hoekverdraaiing

R en $m_{S,x}$ zijn stochasten en S_x is een deterministische variabele (uitkomst uit het deelmodel constructief gedrag voor een enkel scenario).

De leiding (of verbinding) bezwijkt als $Z < 0$. Doordat zowel de belastingen als de weerstand onzekerheden hebben, is het niet zeker wanneer de leiding precies faalt, maar kan er wel

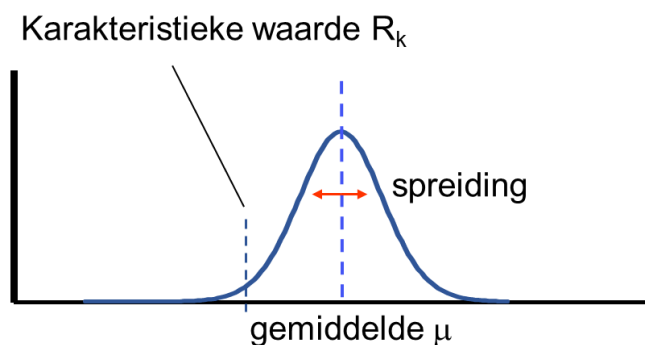
een kans P uitgerekend worden dat $Z < 0$, de faalkans (zie [1] voor een uitgebreidere uitleg). De faalkansberekening (het uitrekenen van $P(Z < 0)$) wordt uitgevoerd met in-house (TNO) software. De uitkomst van deze berekening is een kans op falen; een waarde tussen 0 en 1.

Er worden per leidingdeel een groot aantal grenstoestandsfuncties uitgerekend, namelijk één voor alle 108 invoercombinaties en per invoercombinatie voor alle relevante bezwijkmechanismen. Per invoercombinatie is het bezwijkmechanisme met de hoogste faalkans maatgevend. Het faalkansmodel onthoudt een maatgevende faalkans voor het leidingmateriaal zelf en een maatgevende faalkans per verbinding in het beschouwde stuk leiding.

De modellering van de weerstand en de belasting en hun onzekerheden wordt beschreven in de volgende paragrafen.

6.2.1 Weerstand leiding

Voor de weerstand van de leiding worden bekende formules uit de ingenieurspraktijk gebruikt waarmee een (karakteristieke) waarde van de weerstand af te leiden is die hoort bij het beschouwde bezwijkmechanisme. Vervolgens wordt de onzekerheid beschouwd voor de verschillende materiaaleigenschappen, waarna de weerstand beschreven kan worden met een gemiddelde waarde en variatiecoëfficiënt (mate van spreiding), zie figuur 6.2 als voorbeeld.



Figuur 6.2: Karakteristieke waarde, gemiddelde en spreiding verdelingsfunctie weerstand.

De modellering van de weerstand van de leiding voor stalen, gietijzeren en betonnen leidingen is niet veranderd ten opzichte van Fase 1 van dit project en staat beschreven in [1].

De materiaaleigenschappen voor asbestcement en PVC zijn toegevoegd aan het faalkansmodel. Daarnaast is het bezwijken van de asbestcement, HDPE en PVC-leidingen in huidige fase uitgebreider beschouwd. Voor deze materialen worden zowel de axiale (lengterichting) als tangentiële (breedterichting) spanningen getoetst aan de toegestane (trek)spanning van het materiaal.

Voor alle materiaaleigenschappen zijn aannames gedaan voor gemiddelde waarden en variatiecoëfficiënten van de verschillende parameters. Deze aannames zijn te vinden in Bijlage A.1. Ook voor de eigenschappen van de verbindingen zijn aannames gedaan voor gemiddelde waarden en variatiecoëfficiënten. Deze aannames zijn te vinden in Bijlage A.2.

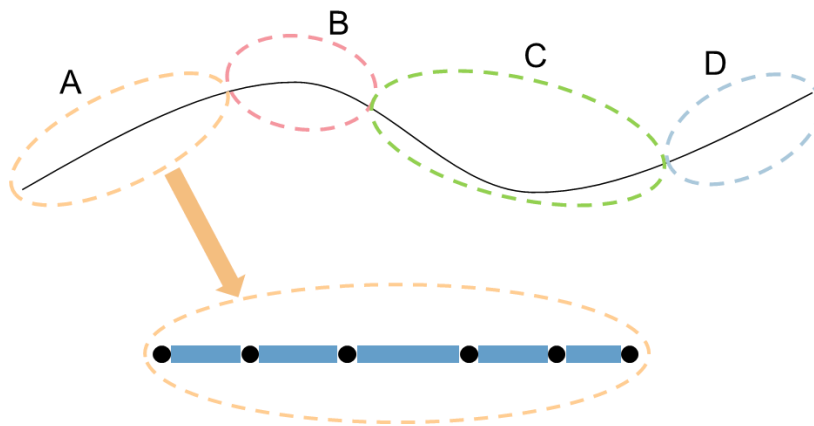
6.2.2 Onzekerheden aan de belastingkant

De onzekerheden aan de belastingkant zijn meegenomen door voor elke belasting te werken met scenariocombinaties zoals beschreven in paragraaf 6.2.

6.3 Oprollen faalkans

Zoals in voorgaande paragraaf beschreven, berekent het fysisch faalkansmodel faalkansen per leidingdeel en per invoercombinatie volgend uit de deelmodellen faalmechanismen uit hoofdstuk 4 (zettingen, wanddikteafname, over- en onderdruk en uitloging; 108 combinaties totaal) voor zowel het leidingmateriaal zelf als voor de verbindingen in het leidingdeel. Deze faalkansen moeten vervolgens worden gecombineerd (opgerold) tot totale fysische faalkansen per leiding.

Zoals in paragraaf 4.2 is beschreven, zullen de afgeleide zettingsverschillen ten gevolge van een overgang in grondprofiel niet overal tegelijk plaatsvinden. Op basis van expert judgement is bepaald hoe vaak een overgang in grondprofiel voorkomt per grondgebied. Bij het oprollen van de faalkansen over (een deel van) de leiding dient hiermee rekening gehouden te worden. De zettingsverschillen ten gevolge van een bovenbelasting (talud) zijn wel met zekerheid op een bepaalde locatie aanwezig. Om de zettingsscenario's toe te kennen aan leidingdelen waarbij geen bovenbelasting aanwezig is, wordt de leiding opgedeeld in clusters waarvoor identieke zettingsscenario's gelden; zetting, lengte waarover deze zetting plaats vindt en gemiddeld aantal van deze zettingsverschillen per cluster. Een cluster bestaat dus uit meerdere leidingdelen van één tot enkele meters. Zie figuur 6.3 voor een voorbeeld van deze opdeling.



Figuur 6.3: Opdeling leiding naar leidingclusters en leidingdelen.

Omdat we niet precies weten waar een zettingsverschil binnen een cluster aanwezig is (behalve bij een bovenbelasting), wordt een extra zettingsscenario naast de drie eerder gedefinieerde zettingsscenario's meegenomen; geen zetting. Het leidingdeel heeft ook dan een faalkans, omdat bijvoorbeeld drukken of wanddikteafname nog steeds tot te hoge spanningen kunnen leiden. Het faalkansmodel rekent dus uiteindelijk met 144 in plaats van 108 scenariocombinaties. Deze faalkansen worden binnen een cluster gecombineerd, afhankelijk van het gemiddeld aantal aanwezige zettingsverschillen binnen een cluster. De locaties van de zettingsverschillen binnen een cluster worden gevarieerd, waardoor een gewogen faalkans (verwachtingswaarde) voor het leidingcluster wordt bepaald. Ter plaatse van een bovenbelasting (talud) wordt de locatie van het zettingsverschil niet gevarieerd, want daar is de locatie met zekerheid vast te stellen. Hoe deze faalkansen precies worden gecombineerd, staat in meer detail beschreven in B.

6.4 Output

Het faalkansmodel berekent faalkansen per leidingdeel en per invoercombinatie volgend uit de deelmodellen faalmechanismen uit hoofdstuk 4 (zettingen, wanddikteafname, over- en onderdruk en uitloging; 144 combinaties totaal) voor zowel het leidingmateriaal zelf als voor de verbindingen in het leidingdeel. Deze faalkansen worden deels opgerold in de cloudberekeningen voor de verschillende invoercombinaties wanddikteafname, over- en onderdruk en uitloging (36 identieke combinaties). Dit levert dus een faalkans per leidingdeel per zettingsscenario (drie scenario's met een zettingsverschil en één zonder zetting). De uitvoer van de cloudberekeningen is een shapefile met voor elk leidingdeel van één meter de faalkansen per zettingsscenario (4 stuks) voor het leidingmateriaal zelf en voor de verbindingen die zich bevinden in de nabijheid van het beschouwde leidingstukje. Ook wordt er een conditionele faalkans berekend, gegeven een zettingsverschil. Daarbij worden de faalkansen voor de 3 zettingsscenario's met een zetting gecombineerd tot één faalkans. Zoals in de vorige paragraaf opgemerkt is de exacte locatie van een zettingsverschil in de meeste gevallen onzeker (behalve ter plaatse van een talud), daarom drukken deze conditionele faalkansen een mate van gevoeligheid uit van het leidingstukje voor falen bij een zettingsverschil. Het is niet zo dat de faalkans van de gehele leiding wordt gegeven door de combinatie van al deze faalkansen. De conditionele faalkansen moeten eerst gewogen worden met de kans van een zettingsverschil ter plaatse, zoals beschreven in Bijlage B.

Naast faalkansen worden in de shapefile ook enkele leidingeigenschappen weergegeven en enkele kenmerkende uitvoerparameters uit de constructieve modelberekening, waaronder de maximaal berekende excentriciteit en von Mises spanning van en in het leidingmateriaal en de maximaal berekende rotatie en verplaatsing in de verbindingen. Samen met de invoerparameters voor het faalkansmodel die volgen uit de deelmodellen voor de faalmechanismen, geeft dit inzicht in de variatie van de invoer en uitvoer over de leiding. Daarmee zijn de belangrijkste parameters af te leiden die de meeste invloed hebben op de faalkans van de leiding.

Met de uitvoer in deze shapefile voor alle leidingstukjes binnen de leiding berekent het faalkansmodel vervolgens een gewogen faalkans (verwachtingswaarde) per leidingcluster en een totale gewogen faalkans voor de gehele leiding op basis van de fysisch gemodelleerde faalmechanismen (fysisch faalkansmodel). Naast een faalkans berekent het model ook een faalfrequentie uitgedrukt in het verwachte aantal gebeurtenissen per kilometer per jaar (zie bijlage B.2 voor de exacte definitie en afleiding). Dit is een eenheid die meer aansluit bij het beheer van persleidingen. De uitvoer per cluster wordt ook weer in een shapefile weergegeven. Op basis van de twee shapefiles kunnen verschillende visualisaties gemaakt worden, zoals in het volgende hoofdstuk weergegeven.

Deze faalfrequentie volgend uit het fysisch faalkansmodel wordt vervolgens gecombineerd met de faalfrequentie uit het statistisch model voor falen door schade door derden (graafschade). Deze faalfrequentie kent ook een ruimtelijke variatie over de leiding en wordt op een zelfde manier opgerold. De laatste faalkans die wordt beschouwd, is die voor het falen van ontluichters (appendages). In deze fase van het project is de exacte locatie van de ontluichters nog niet meegenomen (vaak ook niet bekend). Er wordt daarom een constante verwachtingswaarde meegenomen die is afgeleid voor heel Nederland.

Mochten er onverwachte resultaten volgen, dan is het ook mogelijk om een analyse uit te voeren van de tussenresultaten. Dit geeft inzicht in mogelijke lokale bijzonderheden van de leiding.

7 Cases

7.1 Faalkansen 10 cases

Het faalkansmodel zoals beschreven in hoofdstuk 6 is toegepast op 10 leidingen. Deze leidingen zijn geselecteerd op basis van de beschikbaarheid van inspectiegegevens, waargenomen degradatie en zetting, en de dekking van een range aan gangbare diameters en materiaalsoorten. Tabel 7.1 toont de lijst van de 10 persleidingstracés.

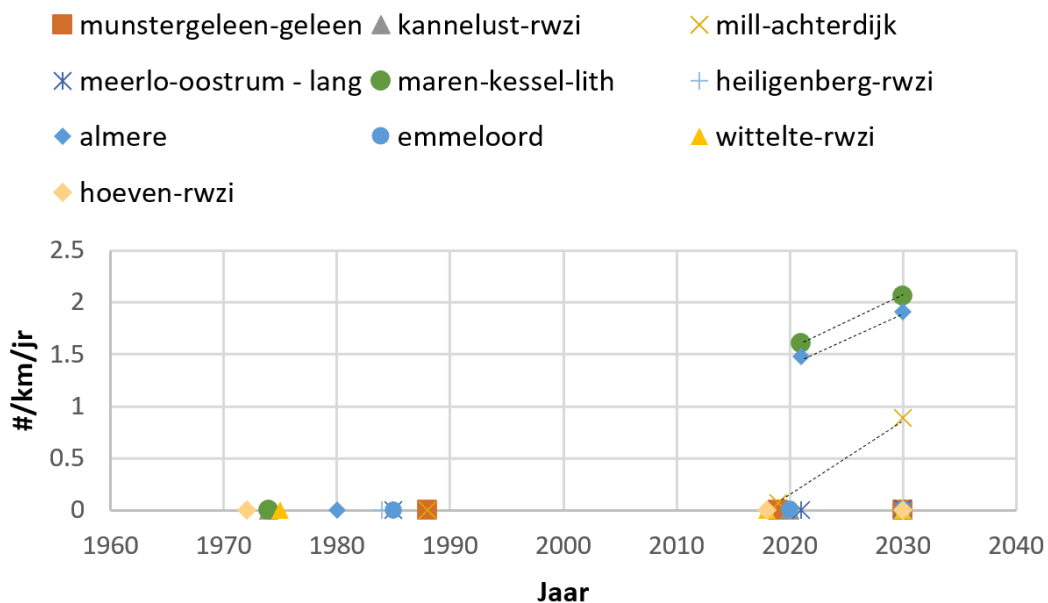
Tabel 7.1: Gegevens van geanalyseerde 10 cases (persleidingstracés)

Tracé	Waterschap	Lengte [m]	Materiaal	Aanleg Jaar	Diameter [mm]
Munstergeleen-Geleen	Waterschapbedrijf Limburg	2039	AC/HDPE	1988	500
Meerlo-Oostrum	Waterschapbedrijf Limburg	6598	AC/staal/GVK	1985	700
Mill-Achterdijk	Aa en Maas	3345	AC	1983	450
Heiligenberg – RWZI	Aa en Maas	5470	AC	1984	600
Maren Kessel - Lith	Aa en Maas	4350	AC/PVC	1974	200
Kannelust - RWZI	Aa en Maas	1394	PVC	1974	400
PL_940 Emmeloord	Zuiderzeeland	5995	PVC	1985	500
PL220 Almere	Zuiderzeeland	3810	AC/PE	1980	600
Wittelte-RWZI	Drents Overijssel Delta	6598	PVC	2022	500
AWP-1	Brabantse Delta	8400	Beton	1972	800

In tabel 7.2 zijn de resultaten voor alle 10 de leidingen weergegeven voor 2030 en het jaar van inspectie. Dit betreffen de faalfrequenties (het aantal gebeurtenissen per km per jaar) voor de gehele leiding die volgen uit het fysische faalkansmodel en het statistisch faalkansmodel (schade door derden) en de faalfrequentie voor de ontlueters. Voor de ontlueters betreft dit een gemiddelde faalkans die is afgeleid voor Nederland, omdat de exacte locaties van de ontlueters voor deze 10 leidingen niet bekend zijn (of niet bekend zijn ten behoeve van dit project). Van de leidingen zijn ook enkele kenmerkende parameters weergegeven die invloed hebben op het fysisch faalkansmodel, zoals het leidingmateriaal, de maximale wanddikteafname door aantasting door H₂S en uitloging en een maat voor de zettingsgevoeligheid (dz/dL)². Hoe groter (dz/dL)², des te meer falen van de leiding mede bepaald wordt door de zettingen die aanwezig zijn. Voor de leiding Maren Kessel-Lith zijn twee situaties doorgerekend; met de in eerste instantie aangenomen initiële wanddikte van 15 mm voor de AC-leidingdelen en met de aangepaste wanddikte van 21 mm na nadere raadpleging van het inspectierapport. De twee rijen betreffen dus dezelfde leiding, maar met verschillende initiële wanddiktes.

Te zien valt dat de faalfrequentie berekend met het fysische faalkansmodel voor de meeste leidingen maatgevend is voor de totale faalfrequentie op drie uitzonderingen na: Munstergeleen-Geleen, Kannelust en Wittelte. In die gevallen wordt de faalfrequentie bepaald door schade door derden of de ontluuchters. De fysisch gemodelleerde faalmechanismen hebben niet veel invloed op deze leidingen. De drie leidingen met de grootste faalfrequenties zijn Maren Kessel-Lith, Almere en Mill-Achterdijk. De resultaten voor de leiding in Almere zullen in de volgende paragraaf verder worden toegelicht. Die voor de overige leidingen zijn te zien in Bijlage C.

In figuur 7.1 zijn de berekende faalfrequenties voor de verschillende leidingen weergegeven in de tijd. Dit betreffen de totale frequenties uit het fysisch model voor het leidingmateriaal, het statistisch model (schade door derden) en de faalfrequentie van de ontluuchters. De figuur geeft de frequentie weer in het jaar van aanleg; dit betreft de faalfrequentie uit het statistisch model en de ontluuchters. Daarnaast is de faalfrequentie in deze fase van het project op twee momenten in de tijd berekend met het fysisch model; voor het jaar van inspectie en in 2030. Om het verloop in faalkans in de tijd juist weer te geven, zou de faalkans voor verschillende momenten in de tijd berekend moeten worden. Het faalkansmodel biedt deze mogelijkheid.



Figuur 7.1: Faalfrequenties voor het leidingmateriaal (totaal van fysisch en statistisch model en ontluuchters) over de tijd voor 10 cases.

De faalkans of faalfrequentie die wordt berekend met het fysische faalkansmodel varieert over de lengte van de leiding. De in de tabel en figuur weergegeven waarden zijn verwachtingswaarden voor de gehele leiding. De resultaten per leidingdeel (per meter) en per cluster zijn te zien in de figuren in Bijlage C.

In tabel 7.3 zijn de faalkansen voor de koppelingen van alle 10 leidingen weergegeven op clusterniveau voor het jaar 2030 en het jaar van inspectie. Van elke leiding is voor 2030 de faalkans voor het minimale en maximale cluster weergegeven, evenals de gemiddelde faalkans voor alle clusters binnen de leiding. Voor het jaar van inspectie is alleen de gemiddelde waarde vermeld. In het geval dat er één of meerdere clusters aanwezig zijn zonder flexibele koppelingen, is de minimale faalkans 0. Er is grote verscheidenheid te zien

tussen de clusters. Dit komt enerzijds door het wel of niet aanwezig zijn van flexibele verbindingen of door externe invloeden die verschillend zijn voor de delen van de leiding, zoals zettingsverschillen of het drukverloop.

Er zijn enkele leidingen met hoge faalkansen voor de verbindingen, zoals Heiligenberg, Almere en Hoeven. Hoewel de faalkansen voor het leidingmateriaal voor Munstergeleen-Geleen berekend met het fysisch model zeer klein zijn en de faalkansen van de ontluchters voor deze leiding maatgevend zijn, worden voor de koppelingen wel faalkansen uitgerekend van dezelfde orde van grootte als de faalkansen van de ontluchters (orde E-03).

Tabel 7.2: Overzicht kenmerken en faalkansresultaten voor het leidingmateriaal voor 10 cases

Leiding	Beheerder	Kenmerken					Resultaten [# gebeurtenissen / km / jaar]				
							Tijdsonafhankelijk		2030		Jaar van inspectie
		Lengte [km]	Materialen ¹	Zettingsgevoelig (dz/dL) ²	Maximale wanddikte-afname [mm]		Statistisch	Ontluchters	Fysisch	Totaal	Totaal
Munstergeleen-Geleen	WBL	2,095	AC (31 mm), HDPE, overig	7E-4	H ₂ S	Uitloging					
Meerlo-Oostrum	WBL	6,465	AC (32 mm), overig	1,7E-3	13,5	9	6.3E-06	1.5E-02	1.7E-02	6E-03 ³	
Kannelust-rwzi	Aa en Maas	1,531	PVC, gietijzer	1E-3	6,2	1,1	3.8E-03	1.5E-04	6E-03	6E-03 ⁴	
MIII-Achterdijk	Aa en Maas	3,416	AC (20 mm), overig	5E-6	11	9,4	6.9E-05	0.88	0.886	7E-02 ⁴	
Maren Kessel-Lith	Aa en Maas	4,379	AC (15 mm), PVC, gietijzer	4E-3	6,4	11,2	1.2E-03	3.44	3.444	2.199 ³	
	Aa en Maas	4,379	AC (21 mm), PVC, gietijzer	4E-3	6,4	11,2	1.2E-03	2.06	2.067	1.610 ³	

¹ In het geval dat een leiding veel verschillende materialen heeft, zijn alleen de 2 of 3 meest voorkomende materialen zijn genoemd.

² 2019

³ 2021

⁴ 2020

Leiding	Beheerder	Kenmerken					Resultaten [# gebeurtenissen / km / jaar]				
		Lengte	Materialen	Zettingsgevoelig (dz/dL) ²	Maximale wanddikte-afname [mm]		Tijdsonafhankelijk		2030		Jaar van inspectie
					H2S	Uitloging	Statistisch	Ontluchters	Fysisch	Totaal	Totaal
Heiligenberg-rwzi	Aa en Maas	5,443	AC (>26 mm), PVC, HDPE, overig	2E-4	12,7	9,2	1.0E-03	2.15E-03	1.3E-02	1.6E-02	1.4E-02 ⁴
Almere	Zuiderzeeland	3,844	AC (>26 mm), HDPE, PVC, gietijzer	2E-2	15	10	1.9E-04		1.91	1.909	1.477 ³
Emmeloord	Zuiderzeeland	6,000	PVC, HDPE, overig	3E-3	9,9	7,2	5.3E-04		1.4E-03	4E-03	4E-03 ⁴
Wittelte-rwzi	WDOD	3,997	PVC, HDPE	8E-4	0	0	8.5E-05		7.7E-11	2E-03	2E-03 ⁵
Hoeven-rwzi	Brabantse Delta	8,321	Beton (75 mm)	9E-3	13,9	9,3	3.5E-05		4.5E-04	3E-03	2E-03 ⁵

⁵ 2018

Tabel 7.3: Overzicht kenmerken en faalkansresultaten voor de verbindingen voor 10 cases

Leiding	Beheerder	Kenmerken				Faalkans verbindingen [0-1] per cluster			
		Lengte	Materialen	Zettingsgevoelig (dz/dL) ²	Druk (RWA en Pmin-trip)	2030			Jaar van inspectie
						Minimaal	Maximaal	Gemiddeld	Gemiddeld
Munstergeleen-Geleen	WBL	2,095	AC, HDPE, overig	7E-4	89 en -43	0	7E-03	4E-03	4E-03
Meerlo-Oostrum	WBL	6,465	AC, overig Korte komeetmoffen	1,7E-3	233 en -100	0.14	1	0.96	-
	WBL	6,465	AC, overig Lange komeetmoffen	1,7E-3	233 en -100	7E-08	0.89	2E-03	2E-03
Kannelust-rwzi	Aa en Maas	1,531	PVC, gietijzer	1E-3	95 en -48	0	2E-10	1E-10	1E-10
Mill-Achterdijk	Aa en Maas	3,416	AC, overig	5E-6	155 en -100	0	3E-09	2E-09	2E-09
Maren-Kessel-Lith	Aa en Maas	4,379	AC (15 mm), PVC, gietijzer	4E-3	153 en -83	3E-11	3E-10	2E-10	2E-10
	Aa en Maas	4,379	AC (21 mm), PVC, gietijzer	4E-3	153 en -83				
Heiligenberg-rwzi	Aa en Maas	5,443	AC, PVC, HDPE, overig	2E-4	445 en -101	2E-12	1	0.93	0.93

Leiding	Beheerder	Kenmerken				Faalkans verbindingen [0-1] per cluster			
		Lengte	Materialen	Zettingsgevoelig (dz/dL) ²	Druk (RWA en Pmin-trip)	2030			Jaar van inspectie
						Minimaal	Maximaal	Gemiddeld	Gemiddeld
Almere	Zuiderzeeland	3,844	AC, HDPE, PVC, gietijzer	2E-2	113 en -28	0	1	0.73	0.73
Emmeloord	Zuiderzeeland	6,000	PVC, HDPE, overig	3E-3	140 en -25	0	7E-03	1E-03	1E-03
Wittelte-rwzi	WDOD	3,997	PVC, HDPE	8E-4	179 en 42	0	1E-10	8E-11	8E-11
Hoeven-rwzi	Brabantse Delta	8,321	Beton	9E-3	437 en 11	0	1	0.96	0.96

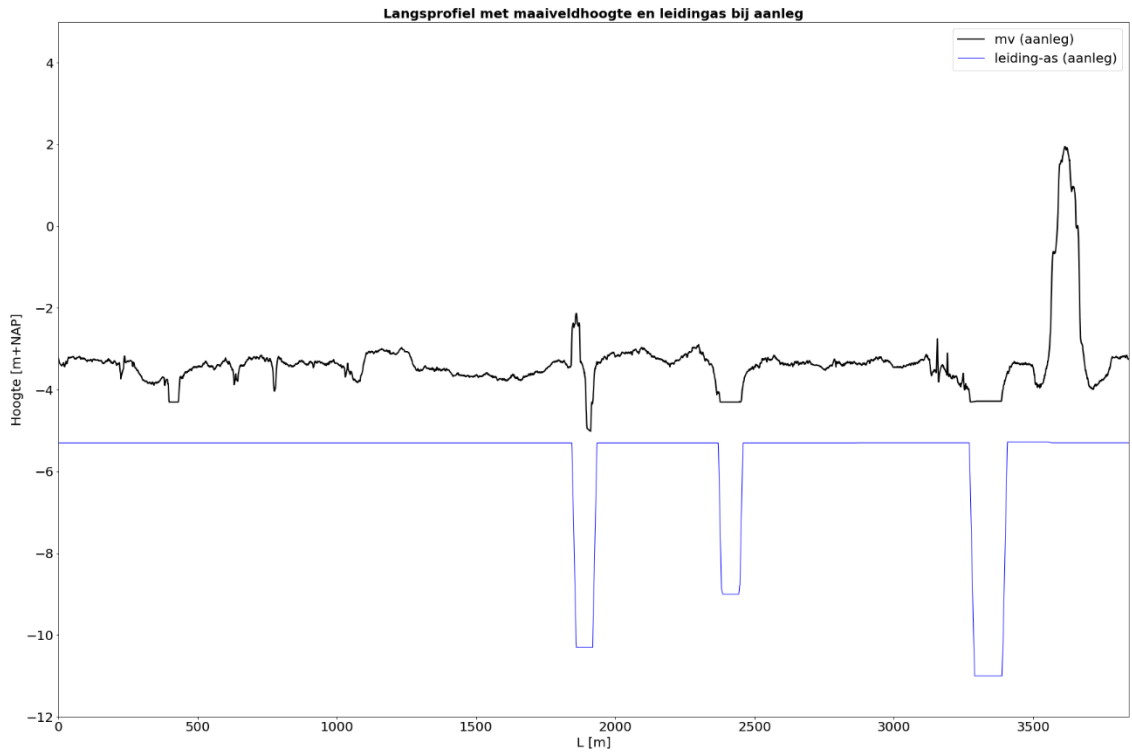
7.2 Uitwerking voorbeeld: case Almere

7.2.1 Beschrijving

Het persleidingtracé tussen Spoordreef en Vlotbrugweg in Almere is in 1980 aangelegd. Het hoofdmateriaal van deze persleiding is AC met een inwendige diameter 600 mm en een wanddikte van 26 mm. Het pompstation bevindt zich bij de Spoordreef. Deze persleiding heeft een lengte van ca. 3810 m. Het persleidingtracé bevindt zich in een zettingsgevoelig gebied met 5-8 m slappe grond (veen en slappe klei) onder het maaiveld. Het bovenaanzicht van het persleidingtracé en de langsdoorsnede zijn in twee figuren (Figuur 7.2 en 7.3) hieronder weergegeven. Het bovenaanzicht van de persleiding met de informatie over het materiaal is in Figuur 7.4 te vinden. Grotendeels bestaat de persleiding uit AC buissegmenten. Onder de watergangen zijn er PE leidingen aanwezig. Ten oosten van het kanaal Lage Vaart zijn alleen PVC en PE leidingen aanwezig.



Figuur 7.2: Bovenaanzicht persleidingtracé PL220 Almere tussen Spoordreef en Vlotbrugweg.



Figuur 7.3: Langsdoorsnede persleidingtracés PL220 Almere tussen Spoordreef en Vlotbrugweg (L = 0 m is Spoordreef).



Figuur 7.4: Bovenaanzicht van verschillende leidingmaterialen bij persleidingtracé PL220 Almere.

7.2.2 Deelresultaten

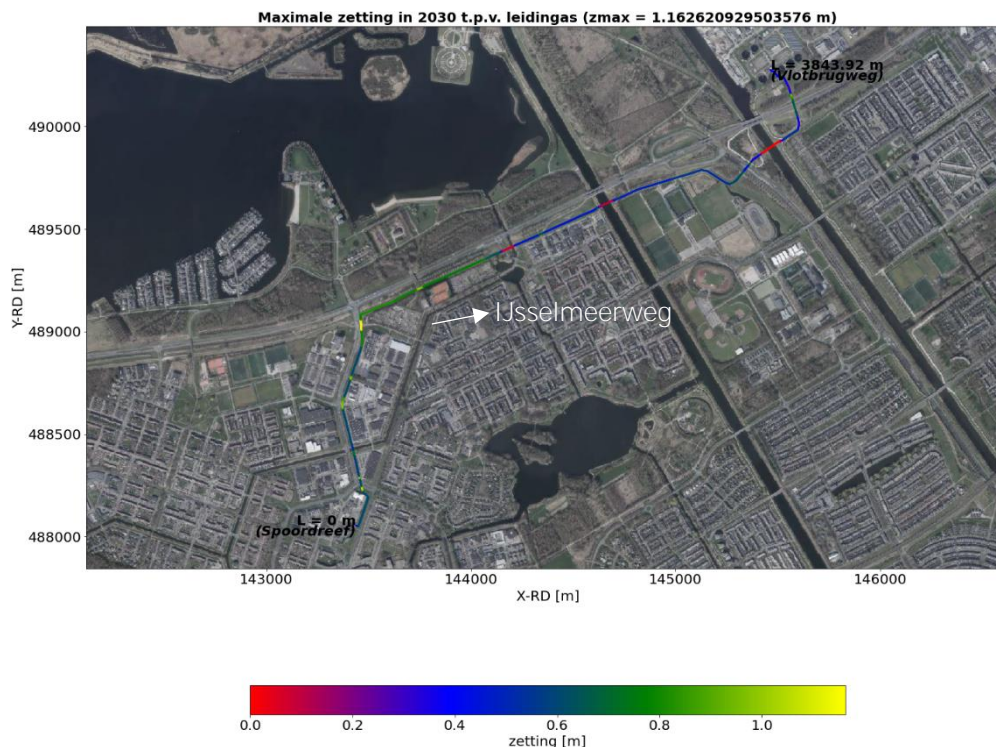
7.2.2.1 Zettingen, inwendige drukken en wanddikte afname

7.2.2.1.1 Zettingen

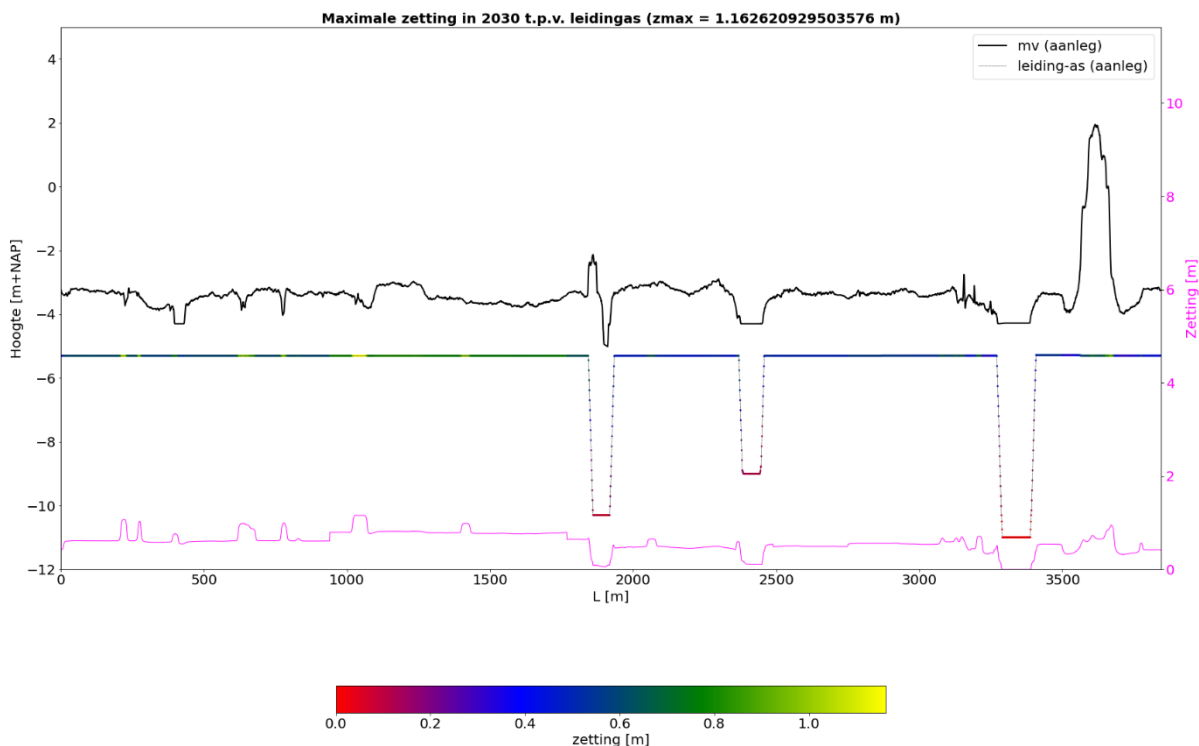
De samenvatting van de berekende zettingen (ter plaatse van de leiding), inwendige drukken en wanddikte afname is hieronder beschreven. Meer informatie over het gebruikte zettingsmodel voor dit persleidingtracé is in Bijlage C7 te vinden. De zettingen en wanddikte afname in 2030 zijn hieronder gepresenteerd.

De zetting van de grond (ter plaatse van de leiding) in 2030 is in de twee figuren (Figuur 7.5 voor de zetting op een bovenaanzicht, Figuur 7.6 voor de zetting in de langsdoorsnede richting) hieronder weergegeven. De maximale zetting bedraagt 1,2 m (50 jaar na de aanleg in 1980) en bevindt zich onder de wegkruising met de IJsselmeerweg.

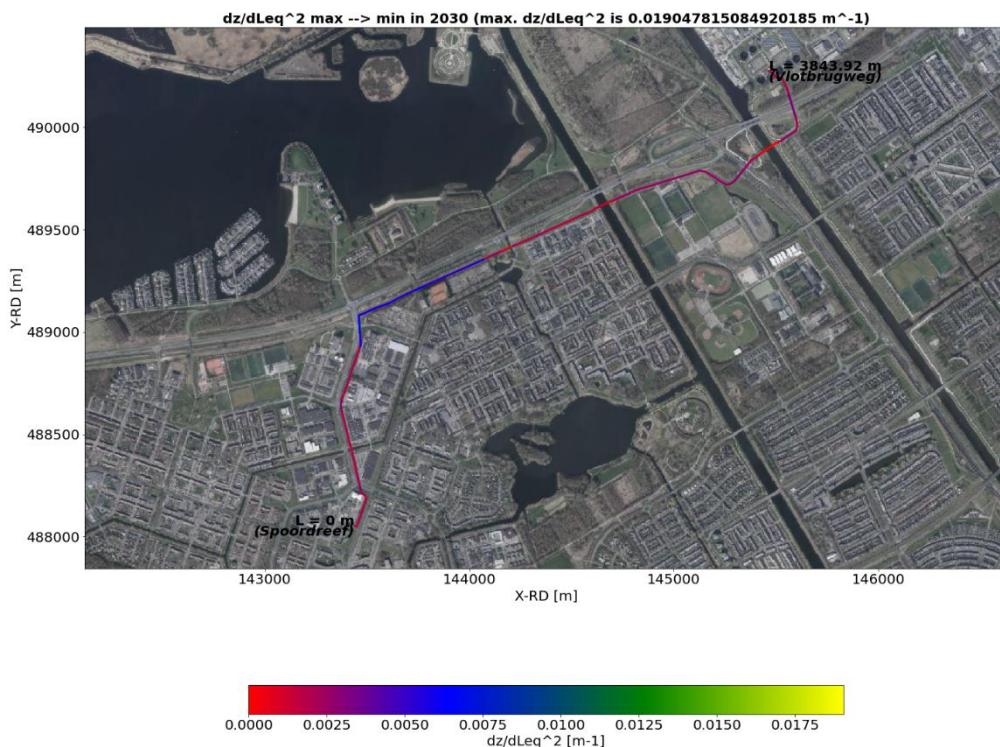
De zettingsverschillen zijn berekend als zettingsverschillen van twee afzonderlijke scenario's. De grootste zettingsverschillen ontstaan daarbij uit de combinatie met de maximale en minimale zetting. Het zettingsverschil gedeeld door een kwadraat van de zettingsverschillengte (dz/dL^2) is een indicatie van de spanning in de leiding ten gevolge van de leiding. De grootste zettingsverschillen gedeeld door de kwadraat van de zettingsverschillengte ($dz_{\max-\min}/dL^2$) 50 jaar na de aanleg is in Figuur 7.7 en 7.8 weergegeven (Figuur 7.7 voor de $dz_{\max-\min}/dL^2$ op een bovenaanzicht, Figuur 7.8 voor de $dz_{\max-\min}/dL^2$ in de langsdoorsnede richting). De grootste $dz_{\max-\min}/dL^2$ bedraagt $0,02 \text{ m}^{-1}$ en is berekend onder het kanaal bij de N702.



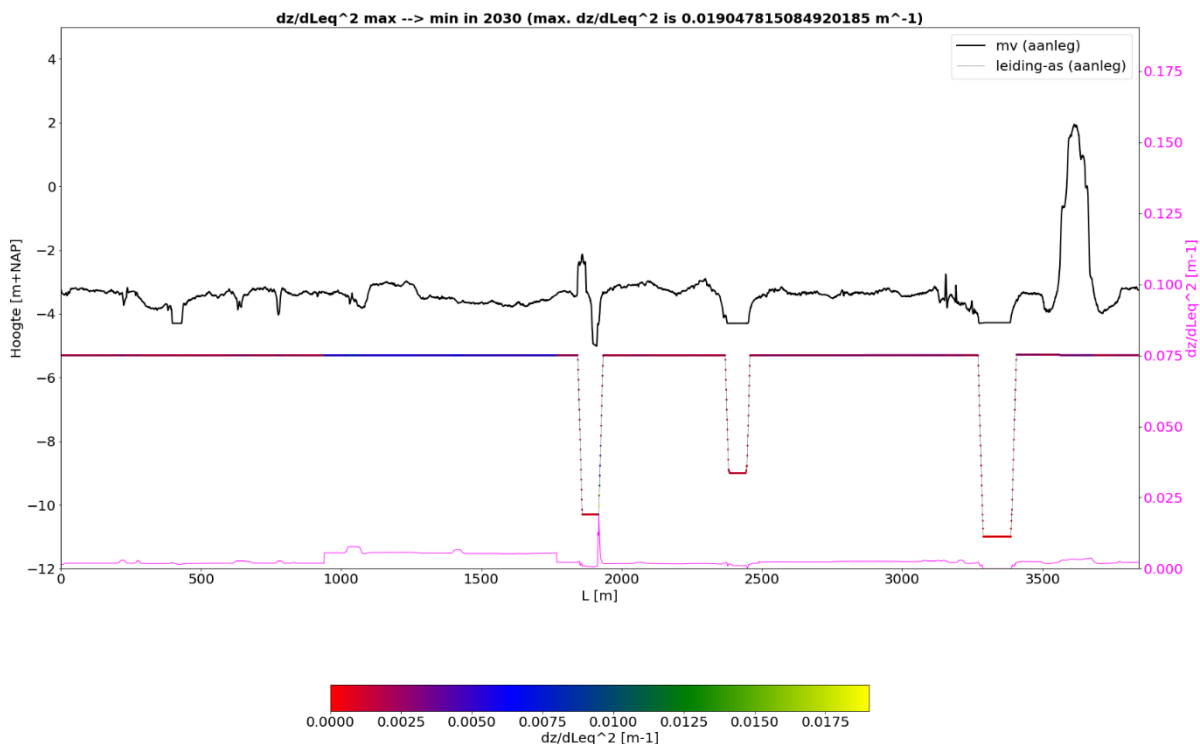
Figuur 7.5: Boven-aanzicht met maximale zetting in 2030, persleidingtracé PL220 Almere.



Figuur 7.6: Maximale zetting in 2030 in de langsdoorsnede richting, persleidingtracé PL220 Almere.



Figuur 7.7: Bovenaanzicht met $dz_{max-min}/dL^2$ in 2030, persleidingtracé PL220 Almere.



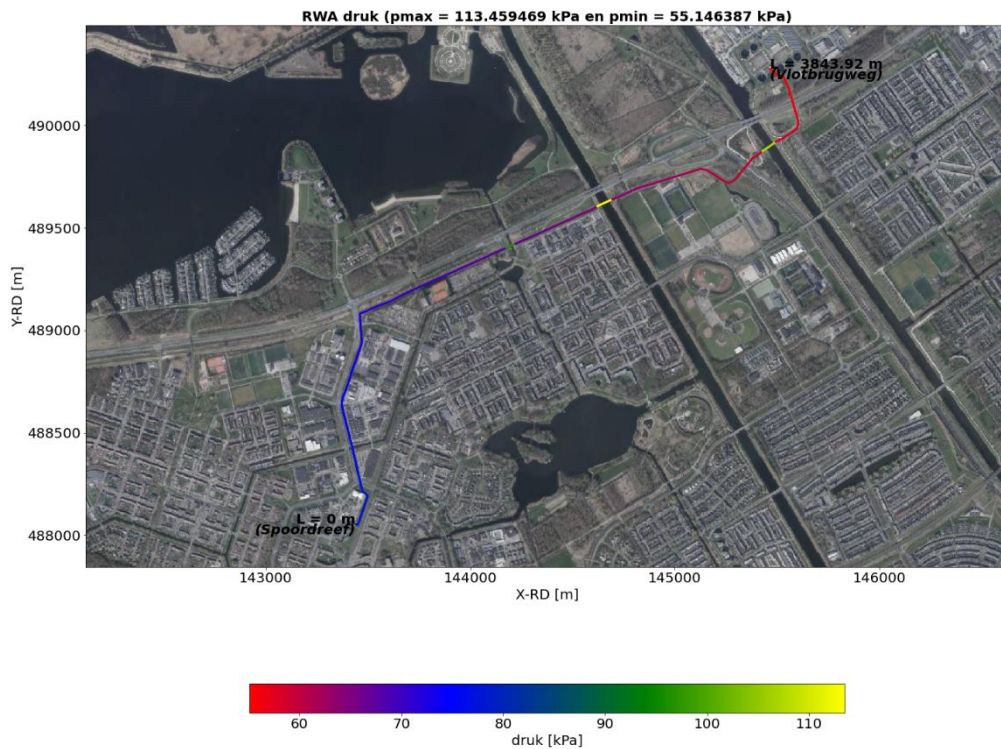
Figuur 7.8: $dz_{\max-\min}/dL^2$ in 2030 in de langdoorsnede richting, persleidingtracé PL220 Almere.

7.2.2.1.2 Inwendige drukken

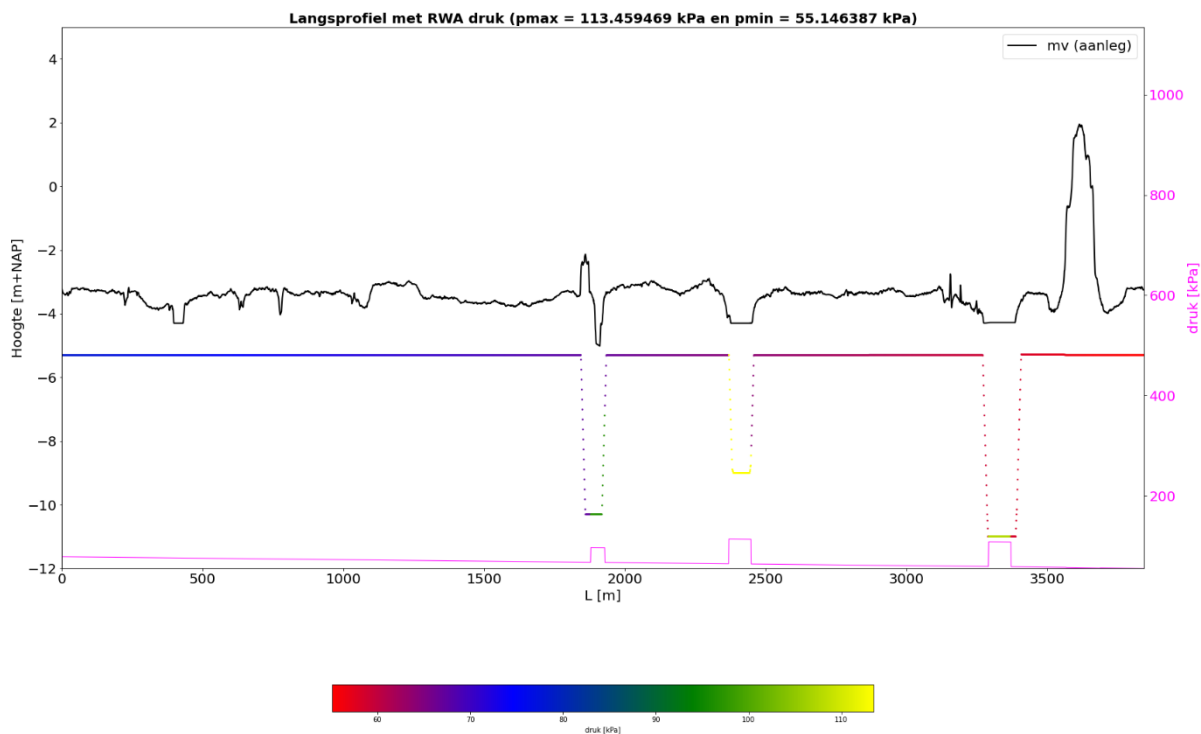
De inwendige drukken zijn berekend voor 4 pomptoestanden scenario's (RWA, DWA, stilstaan en Pmin-trip). De twee grootste extreme drukken zijn te vinden bij RWA (voor positieve druk) en Pmin-trip (voor negatieve druk). Hieronder zijn de berekende inwendige drukken weergegeven (Figuur 7.9 t/m 7.16, elke druk zowel op een bovenaanzicht als in de langdoorsnede richting). De maximale en de minimale inwendige drukken per pomptoestand zijn in Tabel 7.4 opgenomen.

Tabel 7.4: Maximale en minimale drukken per pomptoestand

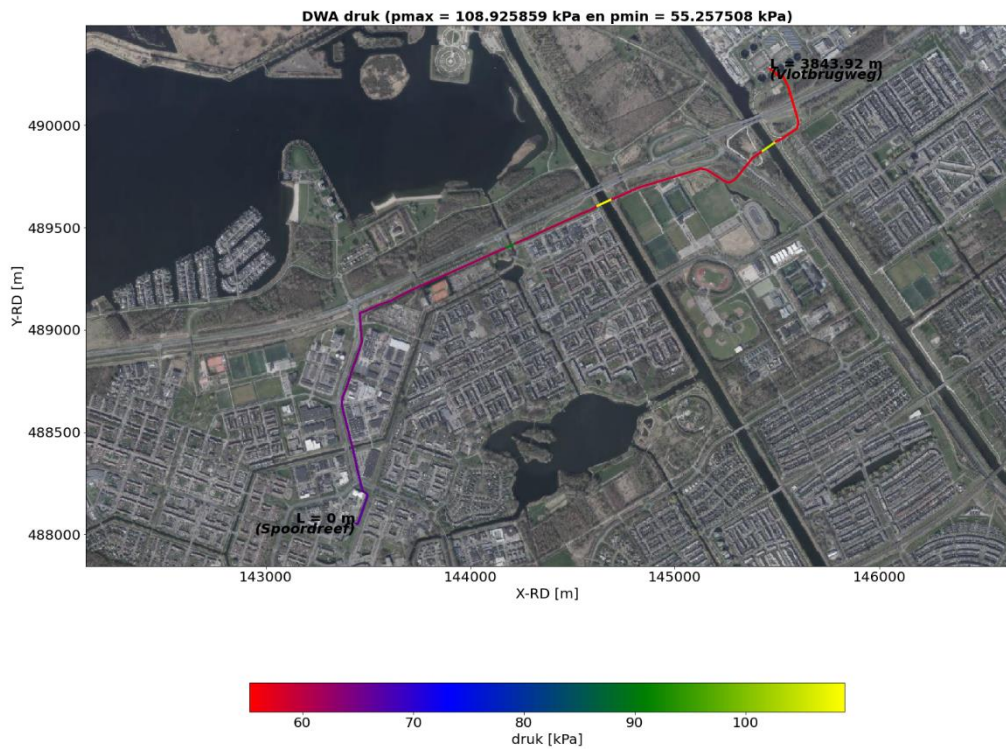
Pomptoestand	Maximale druk [kPa]	Minimale druk [kPa]
RWA	113,5	55,1
DWA	108,9	55,3
Stilstaan	104,5	55
Pmin-trip	69,8	-26,7



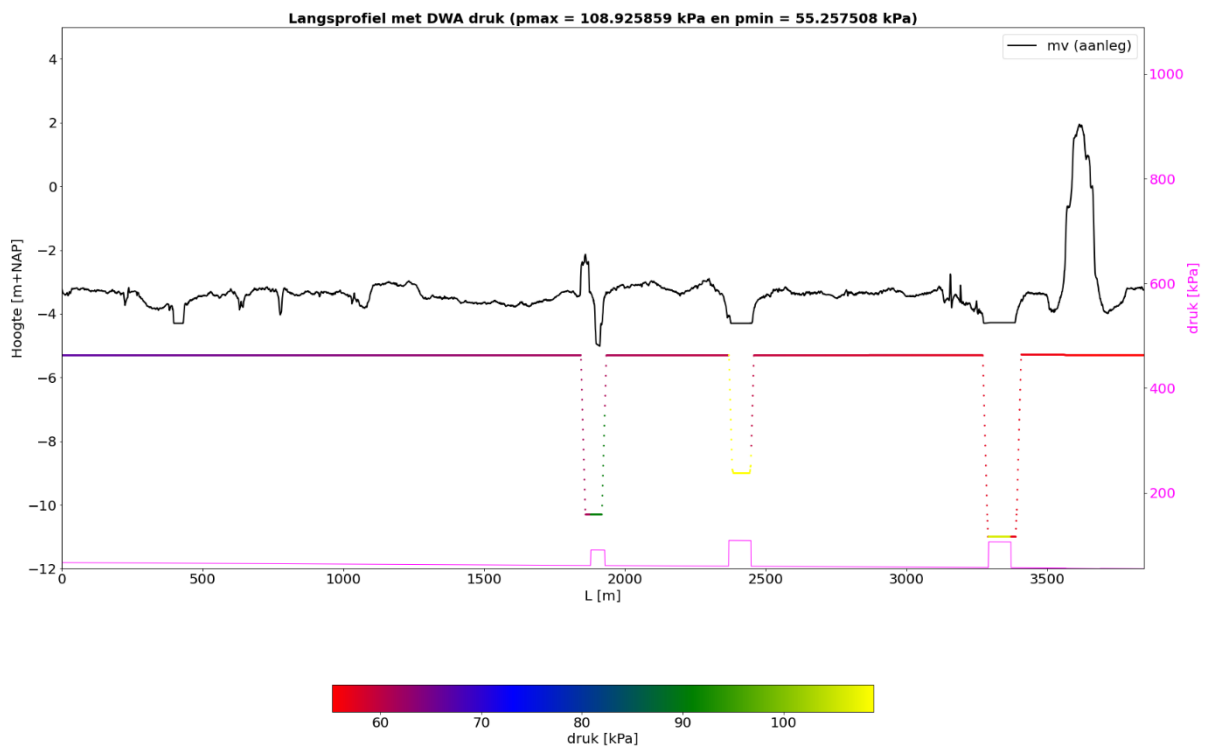
Figuur 7.9: Bovenaanzicht met inwendige drukken tijdens RWA, persleidingtracé PL220 Almere.



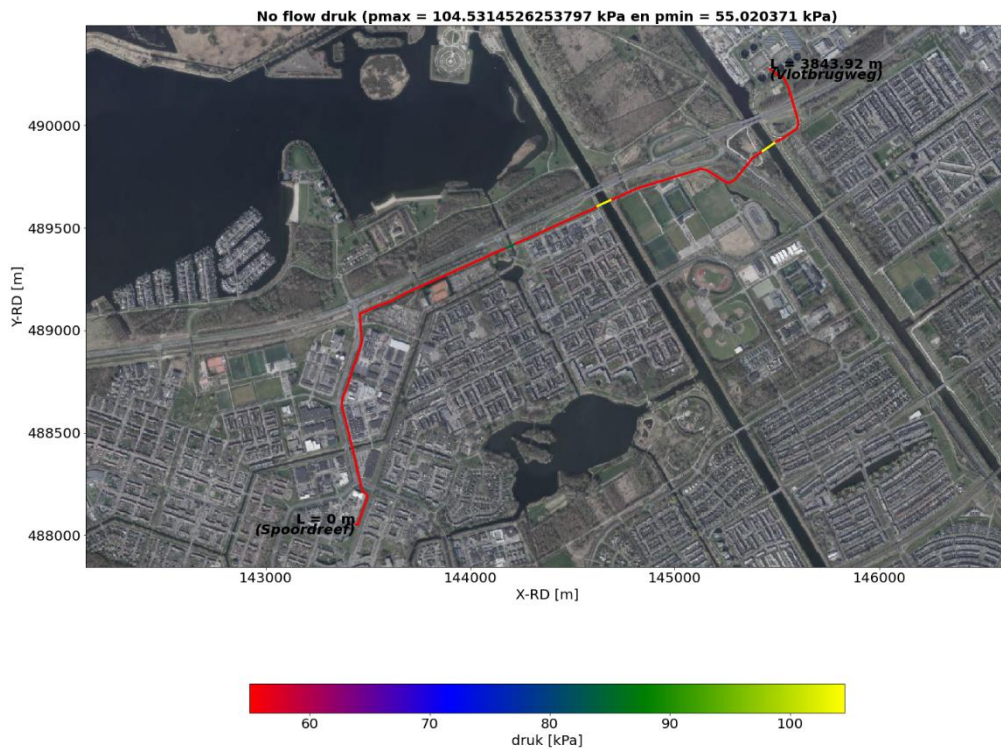
Figuur 7.10: Langsdoorsnede met inwendige drukken tijdens RWA, persleidingtracé PL220 Almere.



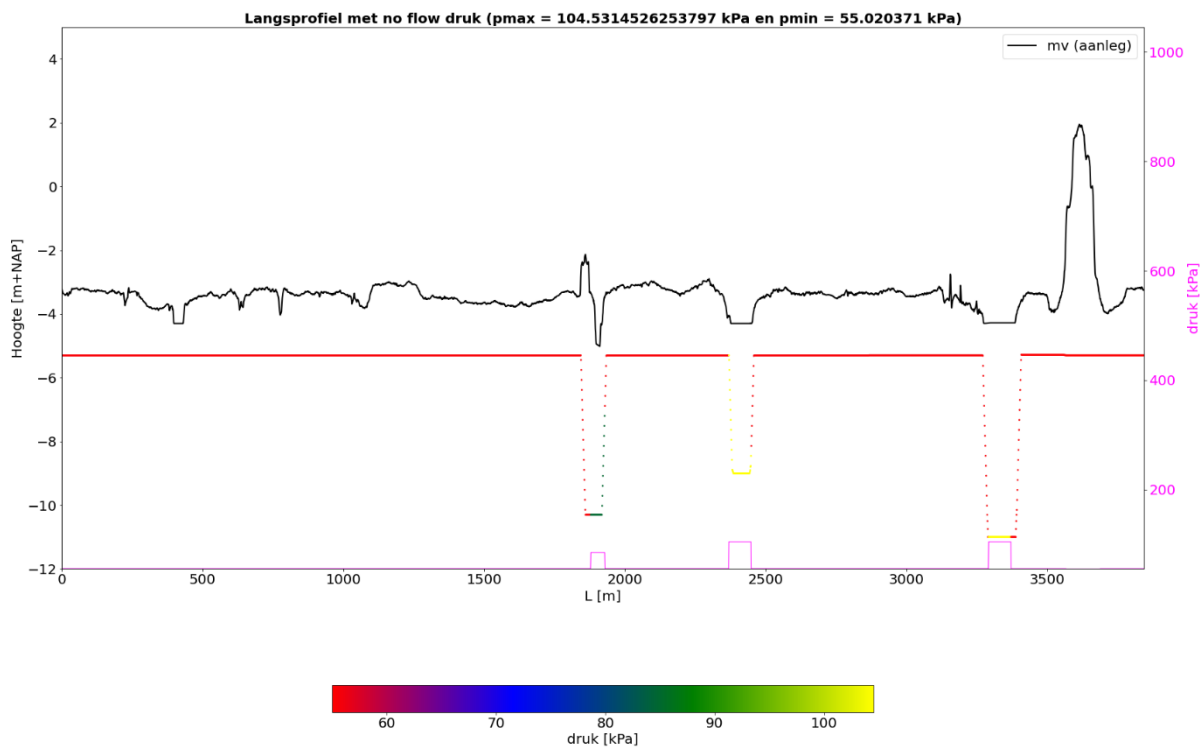
Figuur 7.11: Bovenaanzicht met inwendige drukken tijdens DWA, persleidingtracé PL220 Almere.



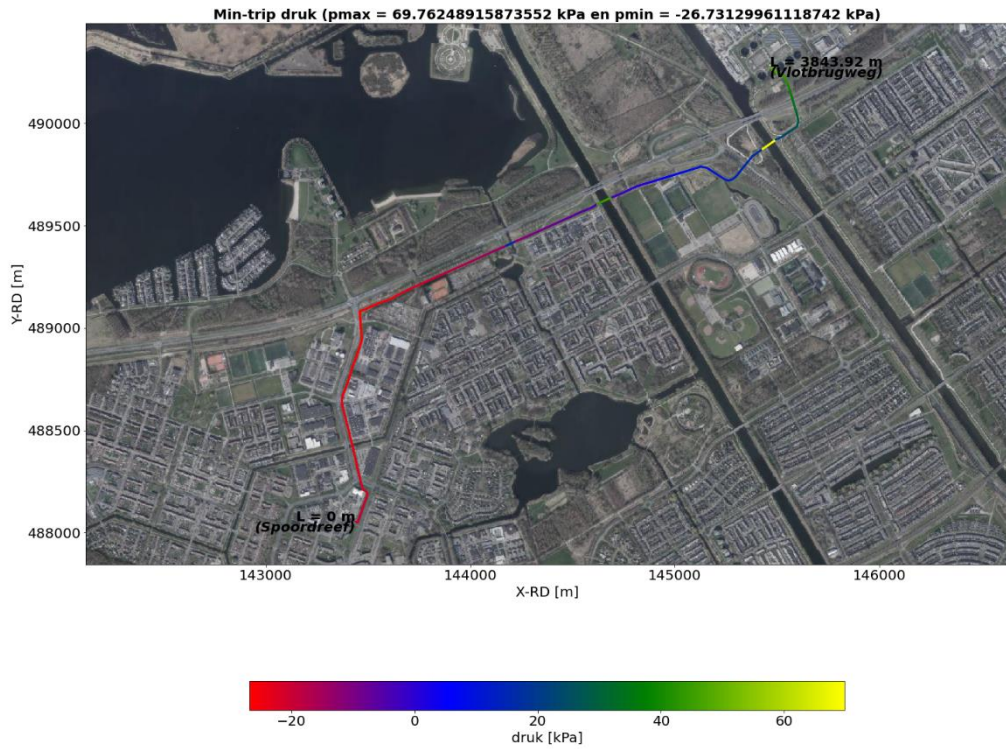
Figuur 7.12: Langsdoorsnede met inwendige drukken tijdens DWA, persleidingtracé PL220 Almere.



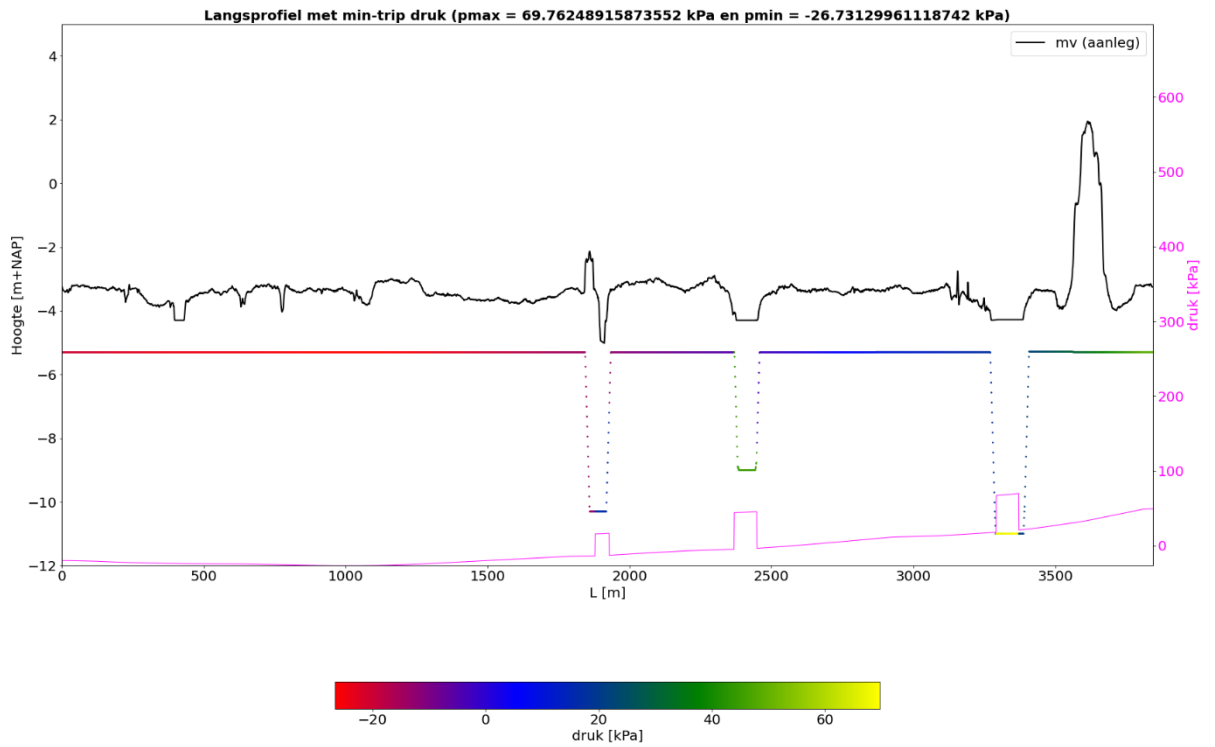
Figuur 7.13: Bovenaanzicht met inwendige drukken tijdens stilstaan, persleidingstracé PL220 Almere.



Figuur 7.14: Langsdoorsnede met inwendige drukken tijdens stilstaan, persleidingstracé PL220 Almere.



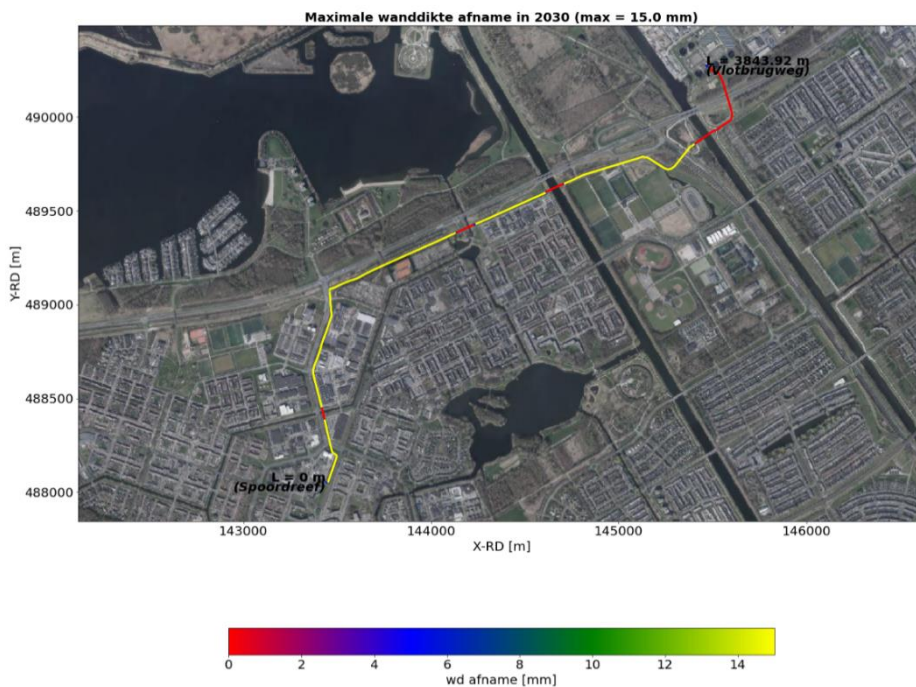
Figuur 7.15: Bovenaanzicht met inwendige drukken tijdens Pmin-trip, persleidingtracé PL220 Almere.



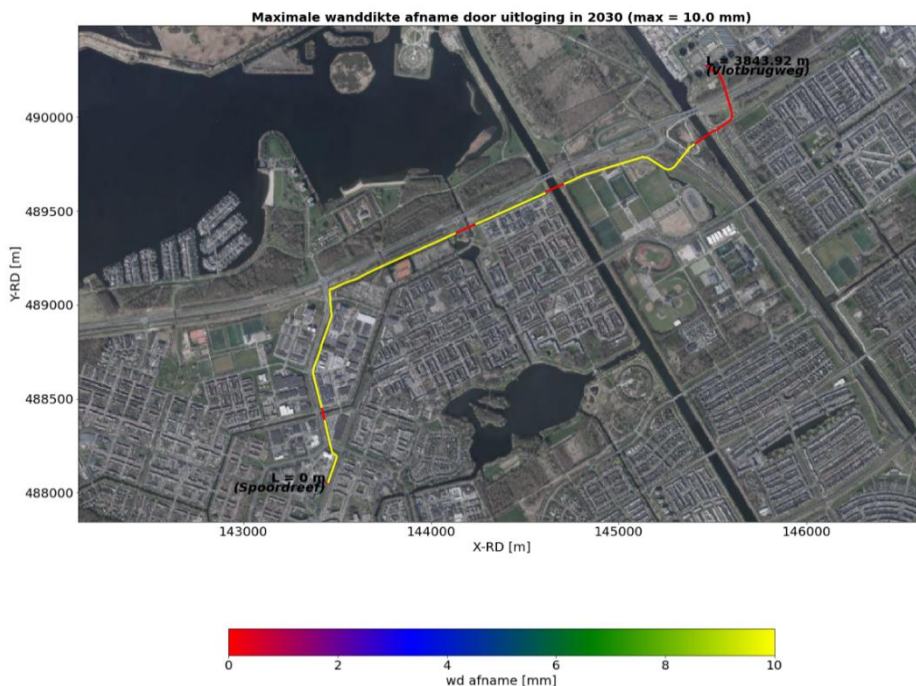
Figuur 7.16: Langsdoorsnede met inwendige drukken tijdens RWA, persleidingtracé PL220 Almere.

7.2.2.1.3 Wanddikte afname

De wanddikte afname aan de binnenzijde persleiding veroorzaakt door H₂S aantasting en uitloging is berekend. De wanddikte afname door de gasophoping en uitloging in 2030 zijn hieronder gepresenteerd (Figuur 7.17 en 7.18).



Figuur 7.17: Wanddikte afname in 2030 door gas ophoping.



Figuur 7.18: Wanddikte afname in 2030 door uitloging.

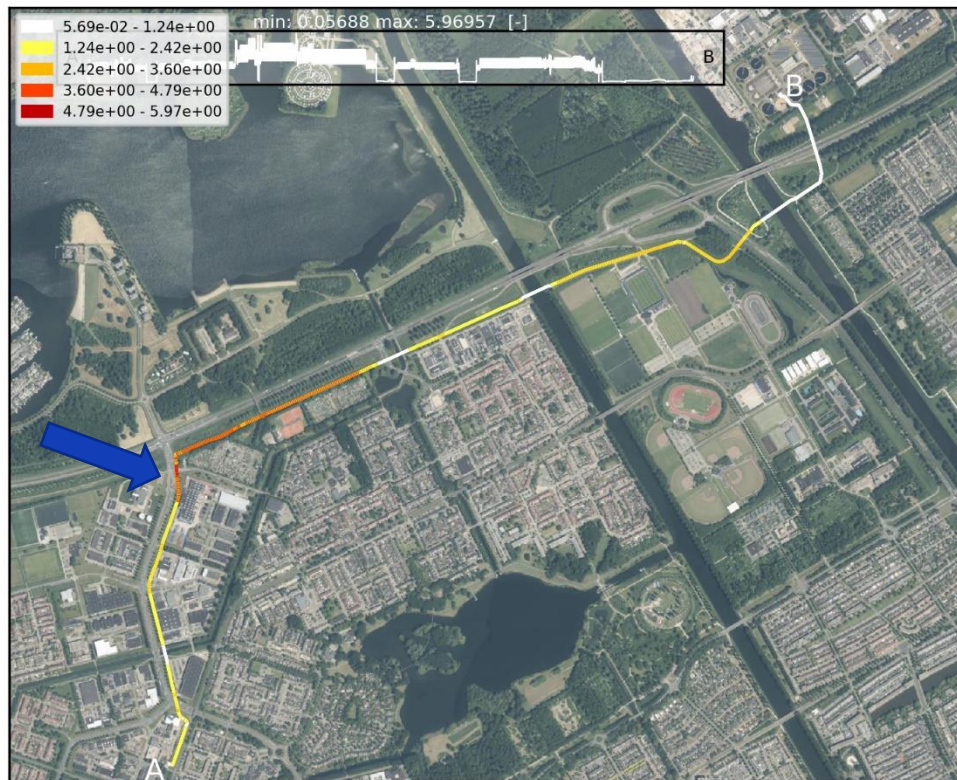
7.2.2.2 Spanning in de leiding en faalkans

Het fysisch faalkansmodel rekent vervolgens de faalkansen uit op een bepaald moment. De leiding in Almere is doorgerekend voor het jaar 2030 en 2021, het jaar van inspectie. Eerst zullen de resultaten voor 2030 getoond worden. Voor 2021 wordt een samenvatting gegeven.

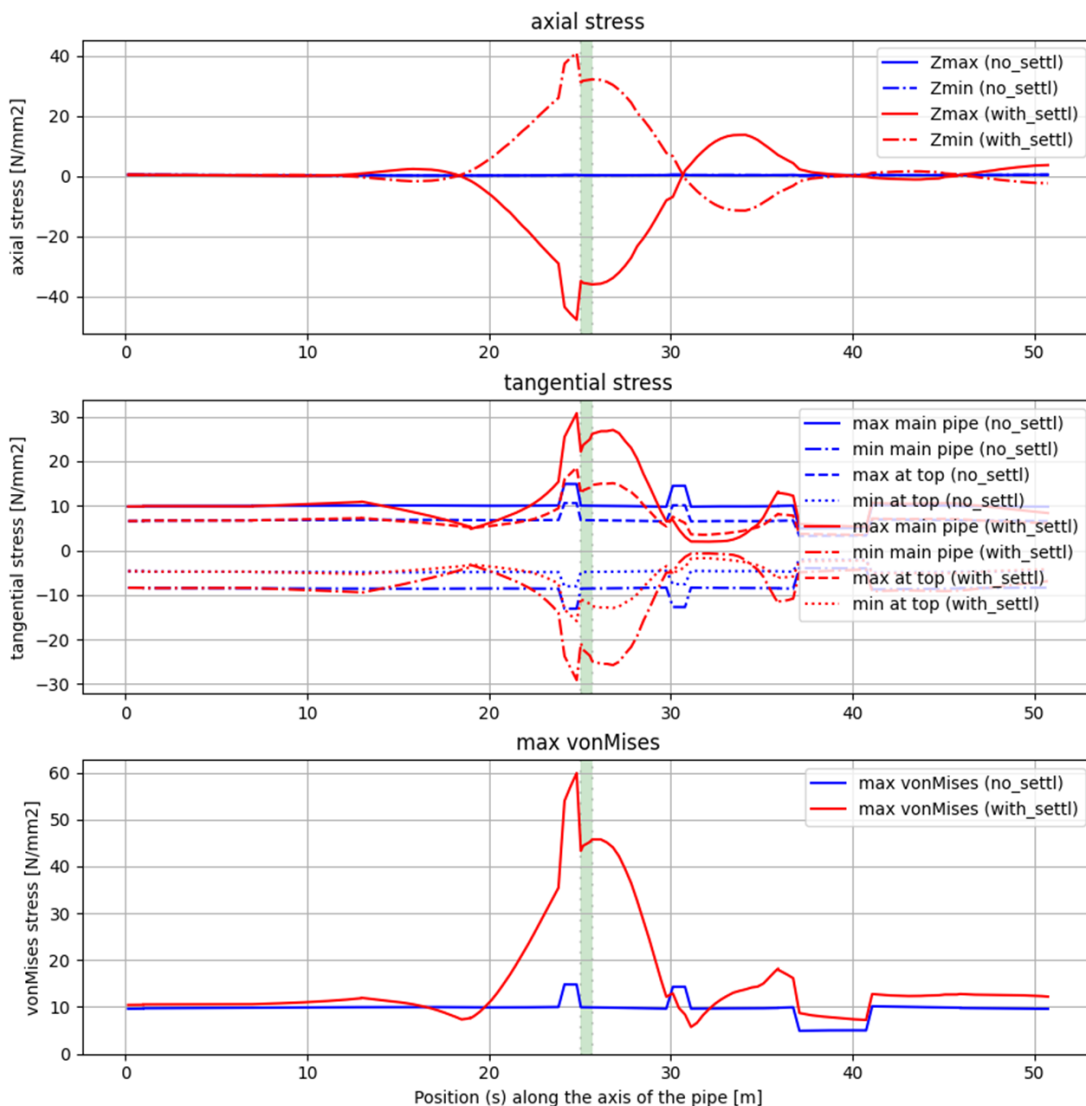
De leiding wordt per leidingstukje doorgerekend voor alle mogelijke combinaties (144) van faalmechanismescenario's zettingen, druk en wanddikteafname door H₂S aantasting en door uitloging. Dit resulteert dus ook in 144 realisaties van spanningen in de leiding en vervormingen van de leiding en zijn verbindingen. In figuur 7.19 is de genormaliseerde von Mises spanning weergegeven die wordt berekend bij de maximale combinatie van scenario's. De maximale spanning is genormaliseerd met de karakteristieke waarde van de materiaalsterkte; bijvoorbeeld de berekende spanningen in AC zijn lager, maar dit materiaal faalt ook bij lagere spanningen. De genormaliseerde spanning geeft daardoor een beter beeld van de meest kritische leidingdelen.

De hoogste waarde wordt gevonden bij de blauwe pijl in figuur 7.19. Van deze locatie is een voorbeeld voor de berekende spanningen te zien in figuur 7.20. Het leidingstukje zelf (1 meter) is groen gearceerd in deze figuur. In figuur 7.21 zijn de verplaatsingen van de leiding weergegeven. Hierin is te zien dat de leiding aan de onderzijde van de buis op twee plaatsen grotere verticale verplaatsingen ondergaat dan de omliggende grond (blauw omcirkeld in de figuur). De leiding drukt hier dus als het ware in de grond en de grond drukt terug. Dit komt overeen met de twee pieken in de tangentiële spanningen in figuur 7.20. De leidingeigenschappen van het beschouwde stuk leiding zijn weergegeven in figuur 7.22. De leiding bestaat hier voornamelijk uit AC op twee korte stukken gietijzer na.

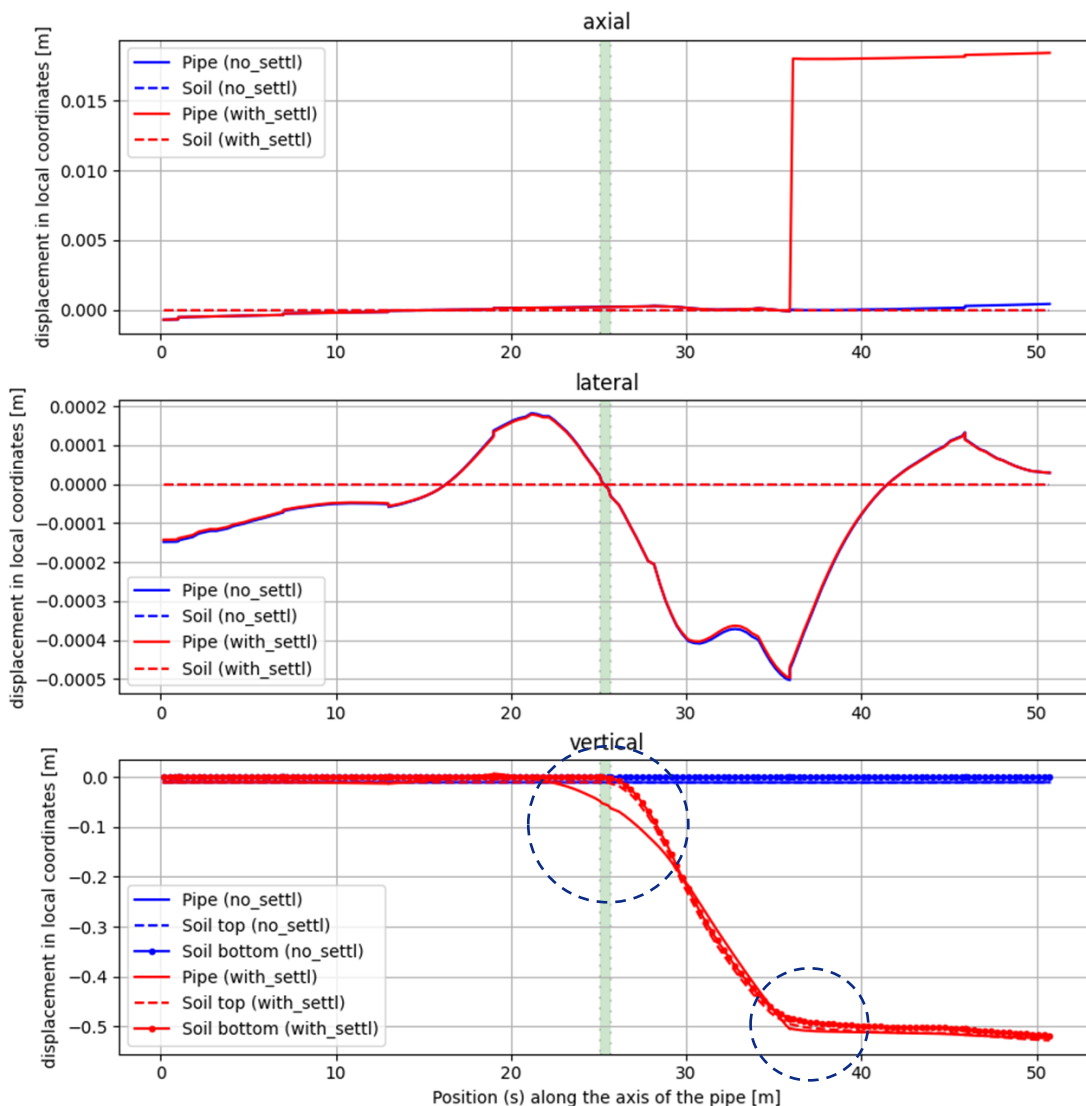
Maximum von Mises stress normalized with characteristic material strength per subpipe [-]



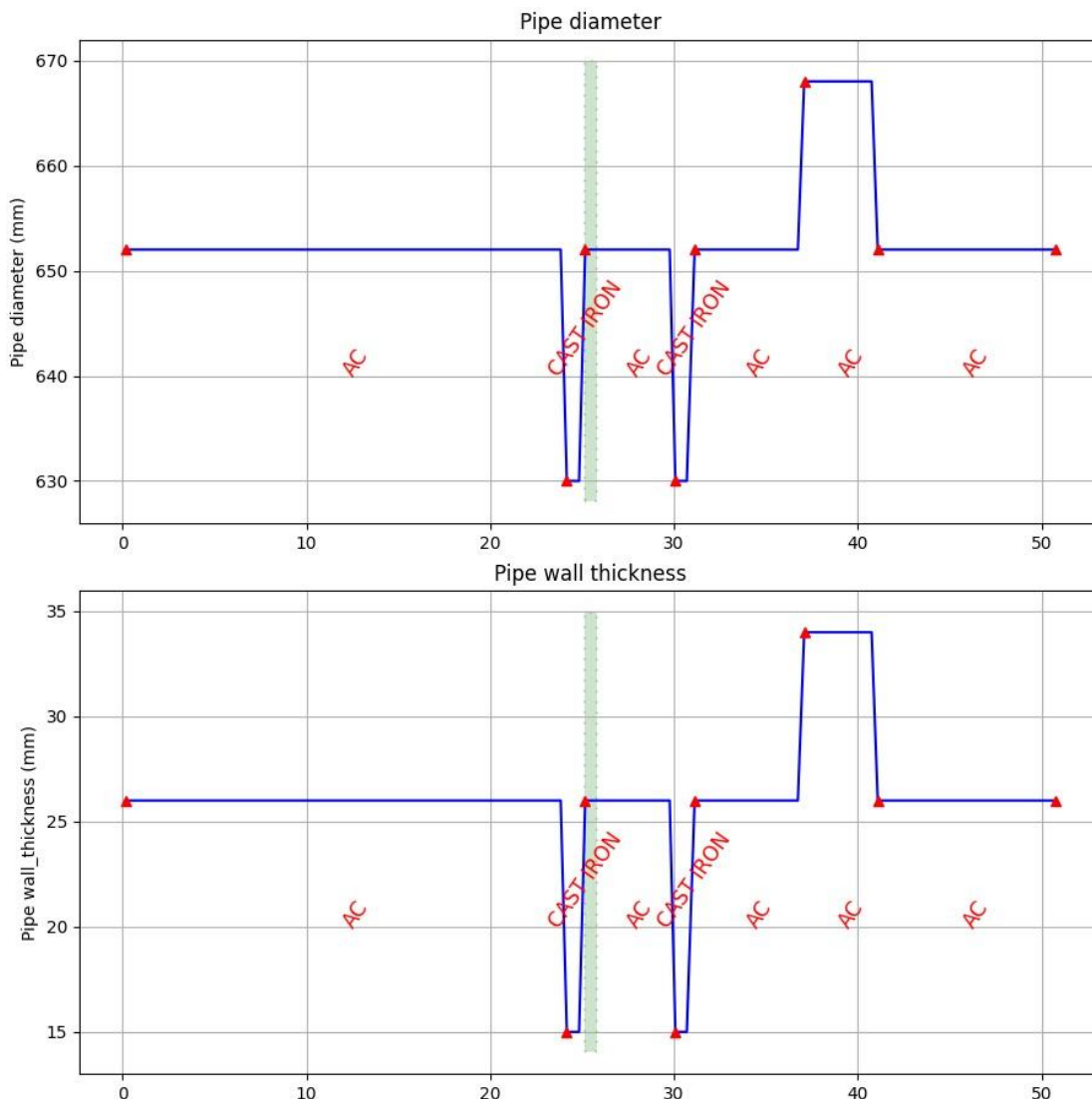
Figuur 7.19: Almere: maximale Von Mises spanningen per meter leiding bij maatgevende scenariocombinatie (zetting x H₂S x uitloging x druk).



Figuur 7.20: Almere: berekende axiale (boven), tangentiële (midden) en von Mises spanningen voor de meest kritische scenario combinatie voor leidingstukje 1087 (locatie van het leidingstukje is groen gearceerd) waarvoor de maximale faalkans berekend is.



Figuur 7.21: Almere: maximale verplaatsingen van de grond en de leiding in axiale (boven), laterale (midden) en verticale richting (onder) ter plaatse van leidingstukje 1087 (locatie van het leidingstukje is groen gearceerd).



Figuur 7.22: Almere: materiaaleigenschappen leidingdiameter (boven) en initiële wanddikte (onder) ter plaatse van leidingstukje 1087 (locatie van het leidingstukje is groen gearceerd).

7.2.3 Faalkansen

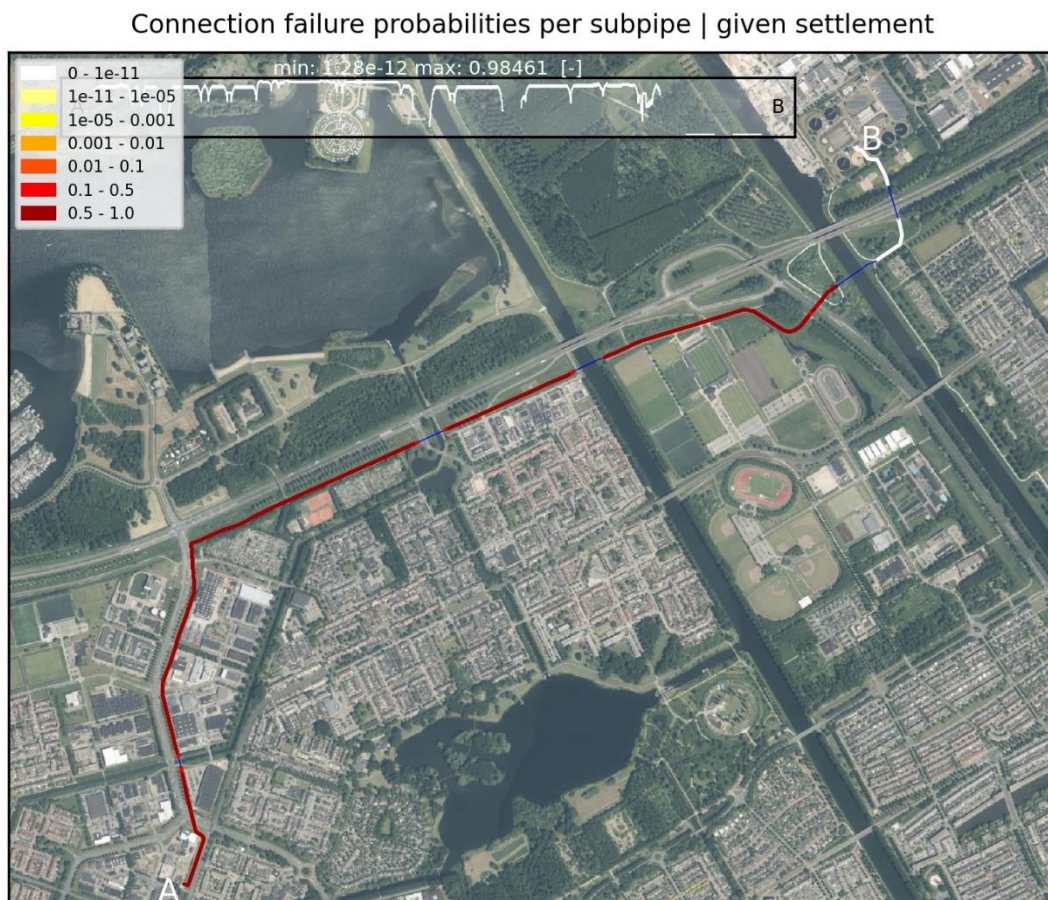
De combinatie van alle scenario's per leidingstukje levert een faalkans per leidingstukje. Deze faalkansen zijn weergegeven in figuur 7.23. Er worden per leidingstukje twee faalkansen bepaald; één gegeven een zettingsverschil ter plaatse van het leidingstukje en één zonder zettingsverschil ter plaatse. De weergegeven faalkansen in figuur 7.23 betreffen de eerste situatie; gegeven een zettingsverschil. De exacte locatie van een zettingsverschil is in de meeste gevallen onzeker (behalve ter plaatse van een talud), daarom drukken deze faalkansen een mate van gevoeligheid uit van het leidingstukje voor falen bij een zettingsverschil. Het is niet zo dat de faalkans van de gehele leiding wordt gegeven door de combinatie van al deze faalkansen. De conditionele faalkansen in deze figuur moeten eerst gewogen worden met de kans van een zettingsverschil ter plaatse.



Figuur 7.23: Almere: faalkansen per meter leiding gegeven een zettingsverschil aanwezig ter plaatse van het leidingstukje in 2030.

De grootste faalkans wordt berekend ter plaatse van de blauwe pijl in figuur 7.23, overeenkomend met de locatie met de grootste genormaliseerde spanning in figuur 7.19. Het beschouwde leidingdeel is van AC. Zowel de axiale (lengterichting) als tangentiële (breedterichting) spanningen worden daarom getoetst aan de toegestane (trek)spanning van 12 N/mm² voor axiale spanningen en 24 N/mm² voor tangentiële spanningen. De berekende axiale spanningen voor de verschillende scenariocombinaties zijn tussen de 21 en 48 N/mm² (35 N/mm² voor het voorbeeld in figuur 7.20). Het is daarom logisch dat er een hoge (conditionele) faalkans van ongeveer 1 berekend wordt.

Ook de koppelingen kunnen falen. De (conditionele) faalkansen voor de aanwezige koppelingen worden apart bepaald en zijn weergegeven in figuur 7.24. Te zien is dat de berekende faalkansen voor bijna heel de leiding groot zijn, behalve voor het stuk leiding richting rwzi Almere (uiteinde B). Dit deel van de leiding bestaat voornamelijk uit HDPE, PVC en gietijzer. De blauwgekleurde delen leiding hebben geen koppelingen die kunnen falen door hoekverdraaiing of verplaatsingen, want de leiding is daar trekvast gekoppeld.



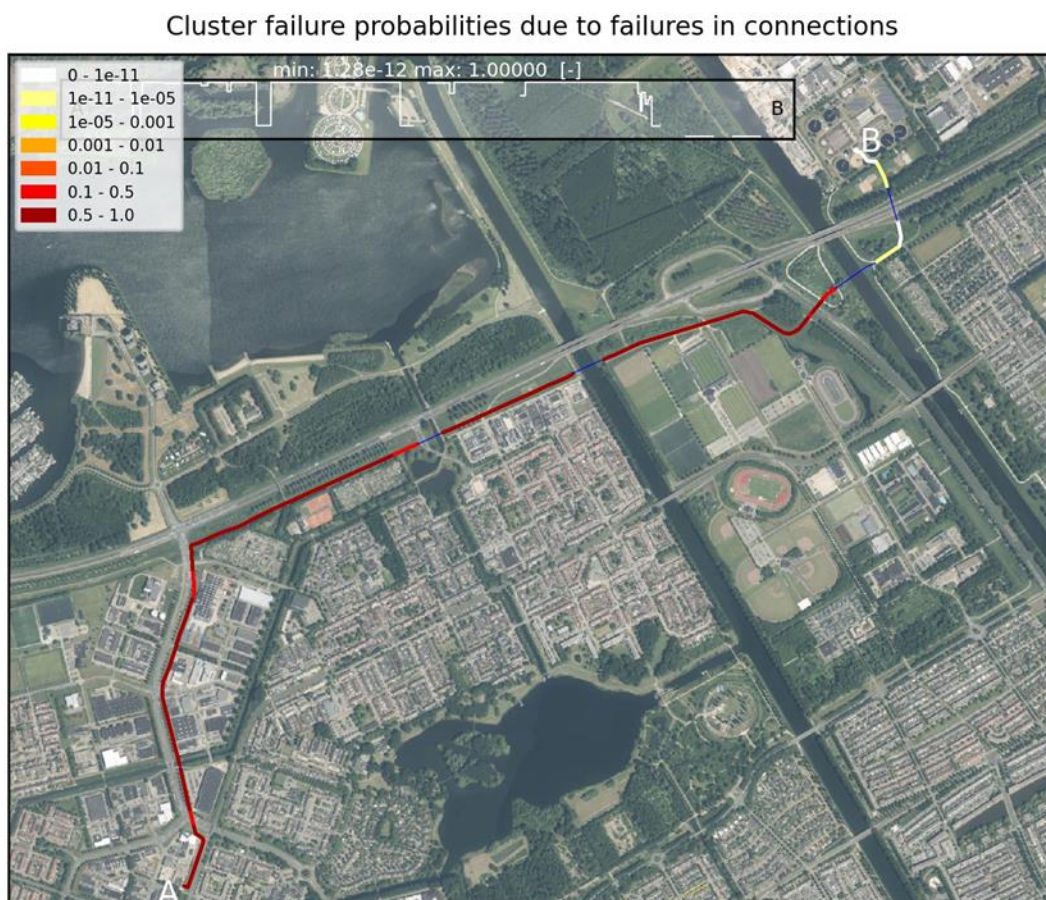
Figuur 7.24: Almere: faalkansen per koppeling gegeven een zettingsverschil aanwezig ter plaatse van het beschouwde leidingstukje in 2030.

De opgerolde faalkansen voor het leidingmateriaal, of eigenlijk faalfrequenties, uitgedrukt in het verwacht aantal faalgebeurtenissen per kilometer per jaar voor de clusters van de leiding zijn weergegeven in figuur 7.25. De maximale faalfrequentie is 21 gebeurtenissen/km/jaar ter plaatse van de oranje pijl. De waarde ter plaatse van de blauwe pijl waar eerder de hoogste faalkansen werden gevonden, is net iets lager, maar van dezelfde orde-grootte. De verwachtingswaarde voor de gehele leiding is zoals weergegeven in tabel 7.2 1, 9 faalgebeurtenissen/km/jaar. Deze waarde is een stuk lager dan de maximale waarde voor de clusters, doordat grote delen van de leiding een lagere faalkans hebben, terwijl de hoge faalkansen worden gevonden op stukken met een lengte veel korter dan 1 km.

De faalkans op clusterniveau voor de koppelingen is getoond in figuur 7.26 (dit betreffen faalkansen met een waarde tussen 0 en 1, geen faalfrequenties). Ook de clusterfaalkansen voor de koppelingen zijn nagenoeg voor de gehele leiding groter dan 0,5 (kans op falen is meer dan 50%).

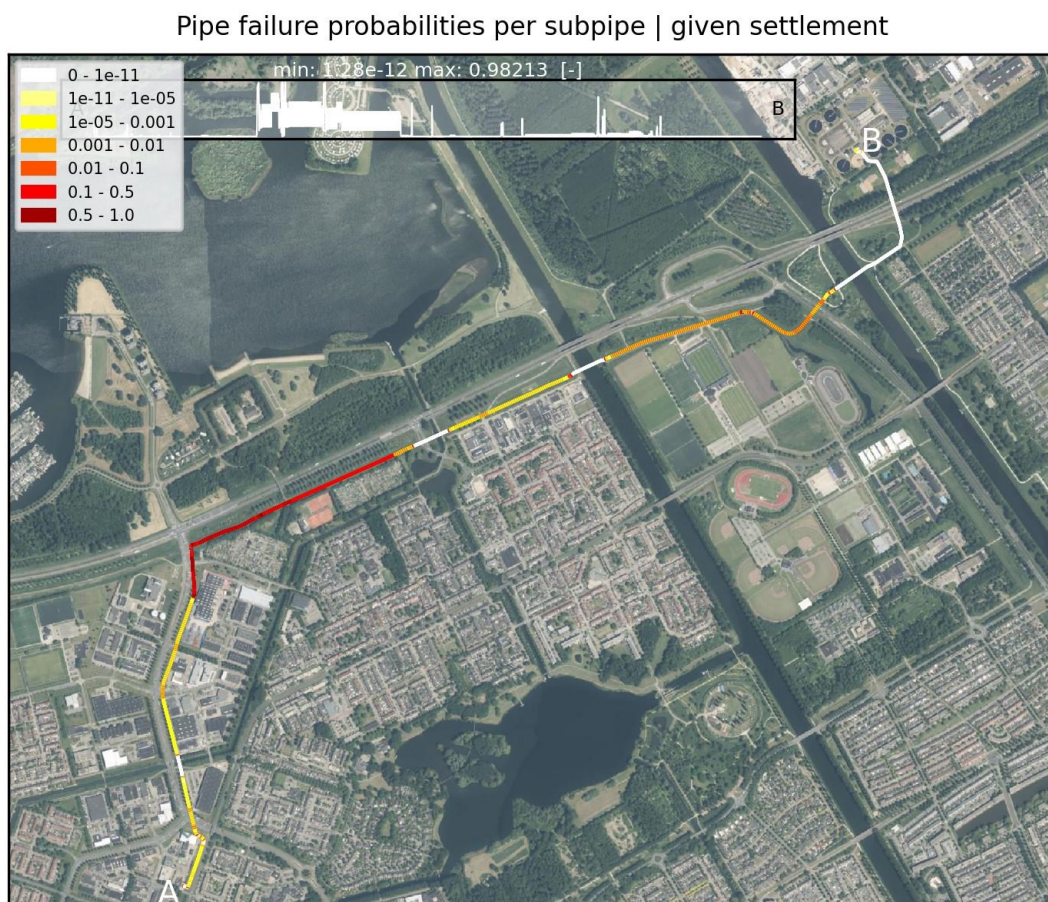


Figuur 7.25: Almere: faalfrequentie per cluster [aantal gebeurtenissen / km / jaar] in 2030.



Figuur 7.26: Almere: faalkans koppelingen per cluster in 2030.

De berekeningen zijn ook uitgevoerd voor het jaar van inspectie, 2021. In figuur 7.27 zijn de conditionele faalkansen per leidingstukje gegeven een zettingsverschil weergegeven. Ook in 2021 worden al grote (conditionele) faalkansen berekend, hoewel de gehele leiding iets minder oranje/rood en iets meer geelgekleurd is. De faalkansen zijn dus wel kleiner dan in 2030. Na oprollen tot clusterniveau en uitdrukking in faalfrequenties (aantal faalgebeurtenissen / kilometer / jaar) is echter hetzelfde beeld zichtbaar als in 2030 en worden de hoogste faalkansen op dezelfde locaties berekend, in 2021 18 gebeurtenissen/km/jaar in plaats van 21 voor 2030. Ook voor de koppelingen zijn de bevindingen vergelijkbaar. De resultaten voor 2021 worden in de volgende paragraaf verder beschouwd en vergeleken met de inspectieresultaten ter validatie van het faalkansmodel.



Figuur 7.27: Almere: faalkansen per meter leiding gegeven een zettingsverschil aanwezig ter plaatse van het leidingstukje in 2021.

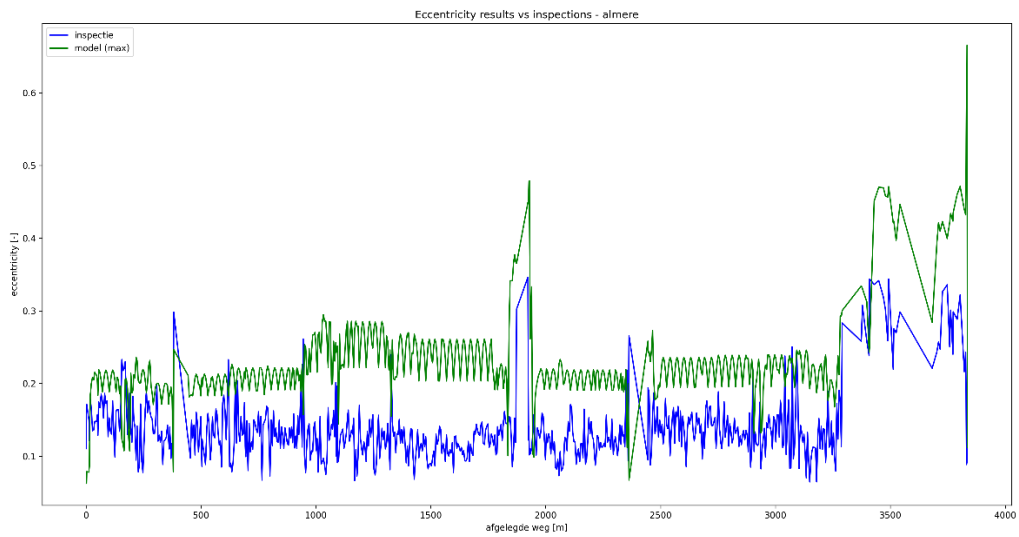


Figuur 7.28: Almere: faalfrequentie per cluster [aantal gebeurtenissen / km / jaar] in 2021.

7.2.4 Validatie

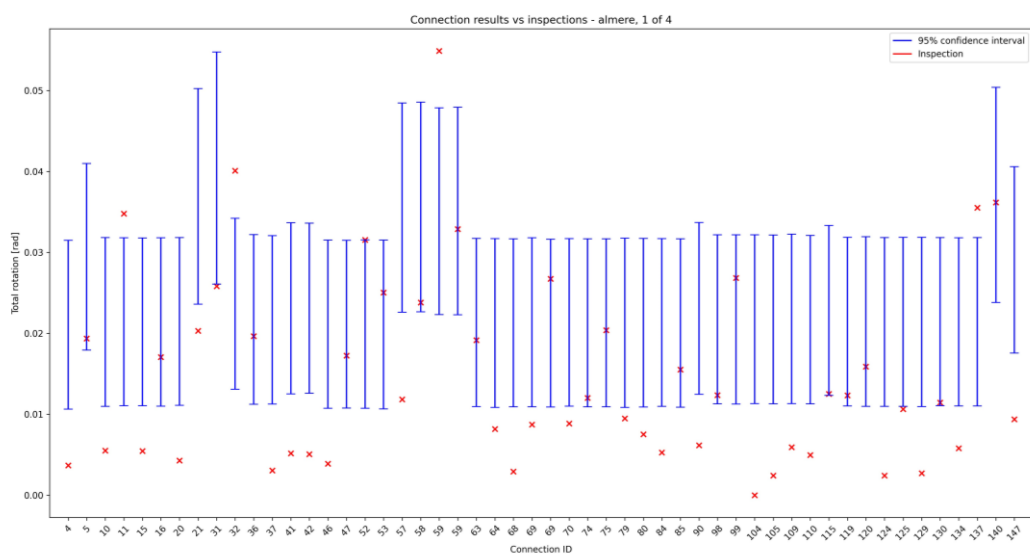
Het valideren van faalkansen zelf is niet mogelijk, omdat zij uitdrukking geven aan een mogelijkheid van falen gegeven een set aan vaak onbekende invoerparameters. Ze brengen daarin dus ook een mate van onzekerheid of in zekere zin, onwetendheid, tot uitdrukking. Wat wel te valideren is, is of het voorspelde gedrag van de leiding, zoals vervormingen die zijn berekend overeen komen met geobserveerde vervormingen tijdens inspecties. Ook de wanddikte zelf is geïnspecteerd wat het wanddikteafname model kan valideren voor de beschouwde leiding. Voor de leiding in Almere is in 2021 een inspectie uitgevoerd.

In figuur 7.29 zijn de gemeten en gemodelleerde ovalisaties uiteengezet. De ovalisatie is een goede maat voor de spanningen in de leiding; des te meer het leidingmateriaal vervormt, des te hoger de spanningen in het materiaal. De ovalisaties in figuur 7.29 berekend door het model, zijn de ovalisaties die horen bij het maximale scenario. Dit is dus geen verwachtingswaarde. Te zien valt dat de berekende ovalisaties het algemene beeld van de gemeten ovalisaties goed volgen; de pieken komen overeen. De gemodelleerde ovalisatie is nagenoeg overal groter dan de gemeten ovalisatie, wat overeenkomt met de verwachting van een maximaal scenario in vergelijking met werkelijke waarde. De invoer van het model zou ook geüpdate kunnen worden aan de hand van de inspectieresultaten, zodat het gedrag op het moment van inspectie in het model overeenkomt met de werkelijkheid. Deze update is in deze fase van het project niet uitgevoerd.

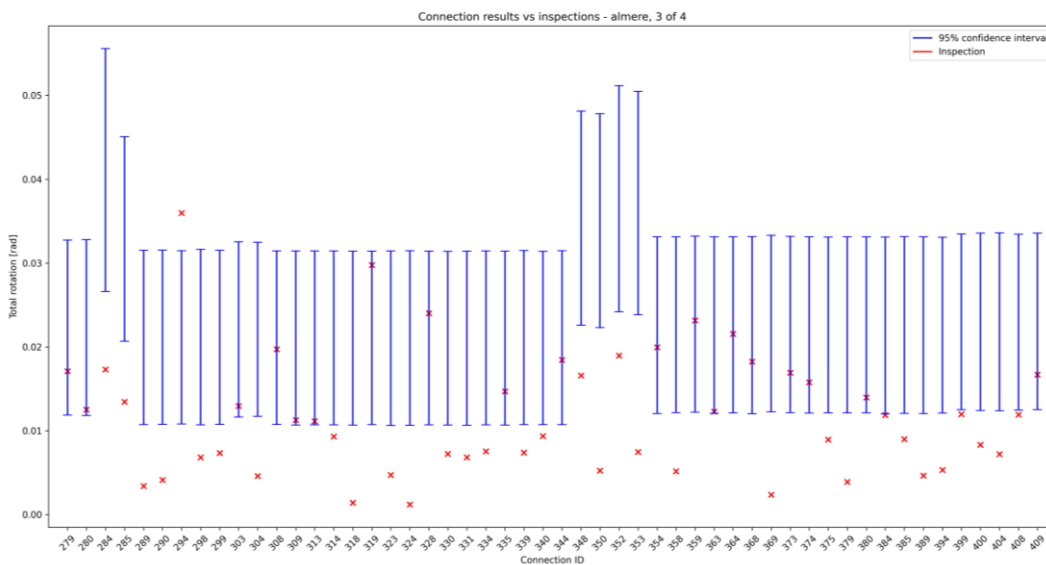


Figuur 7.29: Almere: Gemeten en gemodelleerde (maximale waarden) excentriciteiten in 2021.

Ook de gemodelleerde vervormingen van de koppelingen zijn gecontroleerd aan de hand van de inspectieresultaten. figuur 7.30 toont de rotaties ter plaatse van de koppelingen voor het eerste deel van de leiding. De onzekerheidsband van de modelresultaten is groot, maar de spreiding van de meetresultaten van de verschillende koppelingen is nog groter. Wel valt op dat waar het model gemiddeld grotere rotaties geeft, ook de gemeten rotaties gemiddeld genomen iets groter zijn. In het algemeen geeft het model een goede voorspelling van de rotaties (orde-grootte) in dit deel van de leiding. In figuur 7.31 zijn de rotaties voor een ander deel van de leiding weergegeven. Hier valt op dat de gemodelleerde rotaties in nagenoeg alle gevallen groter zijn dan de gemeten waarden. De gemodelleerde rotaties worden in dit geval bijna overal bepaald door de aannames in de initiële verplaatsingen tijdens aanleg. Dit betreft op dit moment nog een zeer versimpeld model en zou in een toekomstige fase van het project verfijnd kunnen worden, waardoor de voorspelling ook voor dit deel van de leiding mogelijk verbeterd.

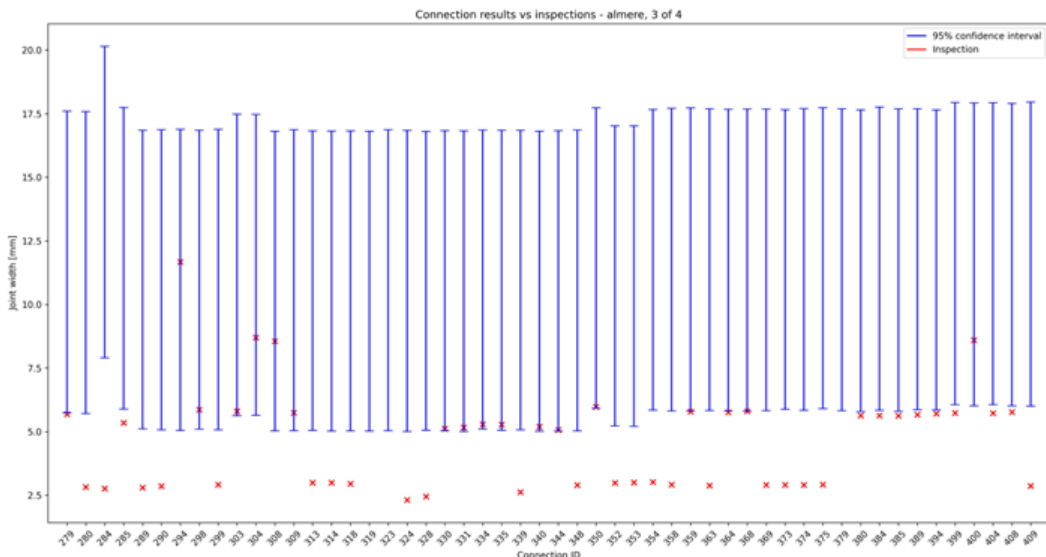


Figuur 7.30: Almere: Gemeten en gemodelleerde rotaties (95% onzekerheidsband) ter plaatse van de koppelingen in radialen in 2021 voor deel 1 van de leiding.

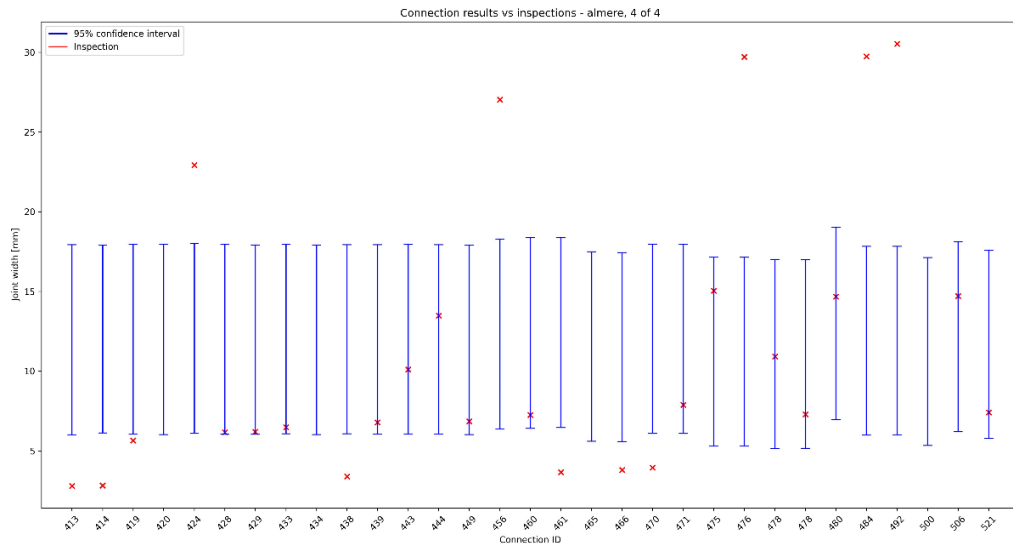


Figuur 7.31: Almere: Gemeten en gemodelleerde rotaties (95% onzekerheidsband) ter plaatse van de koppelingen in radialen in 2021 voor deel 3 van de leiding.

De verplaatsingen van de leiding ter plaatse van de koppelingen laten eenzelfde beeld zien. Op sommige locaties geeft het model een flinke overschatting, zoals te zien in figuur 7.32, terwijl in andere delen van de leiding de modelresultaten goed overeenkomen met het beeld tijdens inspectie, zoals in figuur 7.33. Ook dit kan deels veroorzaakt worden door het versimpelde model voor initiële verplaatsingen tijdens aanleg.

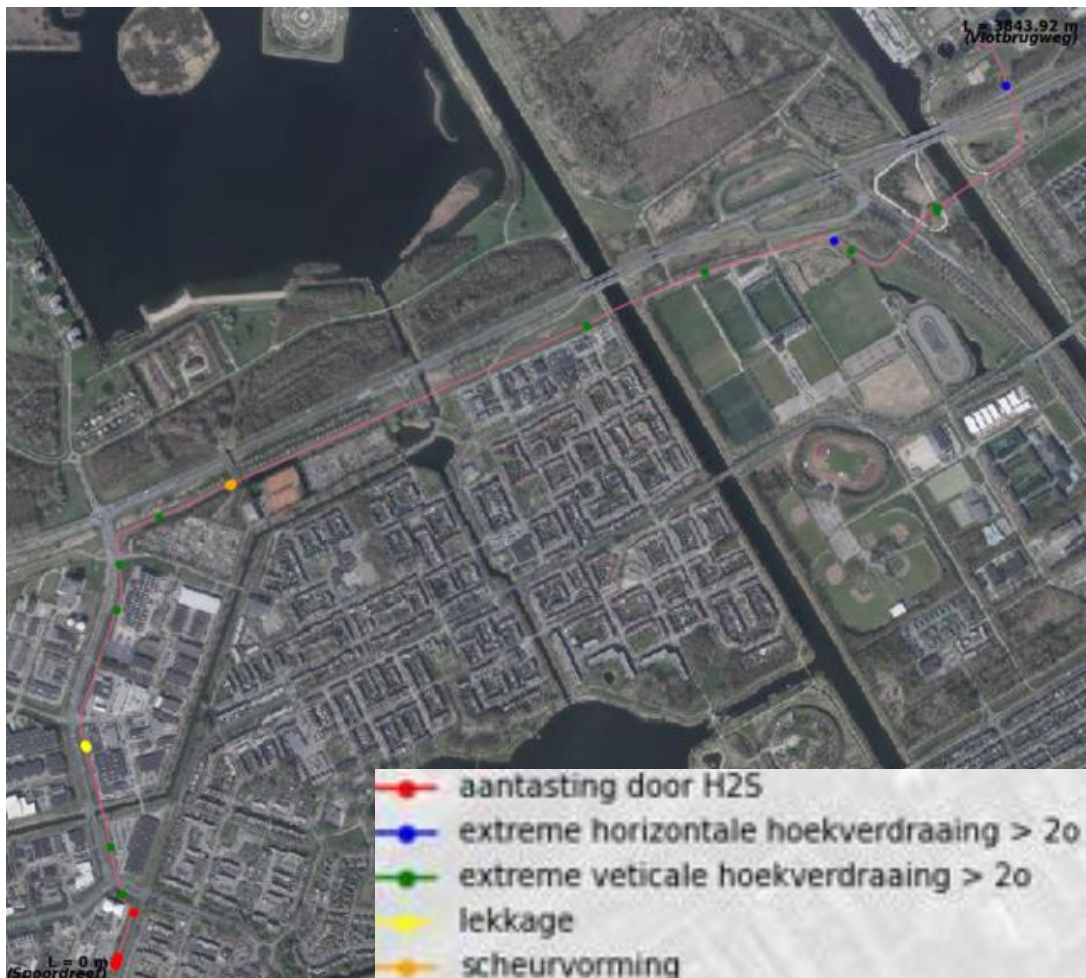


Figuur 7.32: Almere: Gemeten en gemodelleerde verplaatsingen (95% onzekerheidsband) ter plaatse van de koppelingen in mm in 2021 voor deel 3 van de leiding.



Figuur 7.33: Almere: Gemeten en gemodelleerde verplaatsingen (95% onzekerheidsband) ter plaatse van de koppelingen in mm in 2021 voor deel 4 van de leiding.

In figuur 7.34 hieronder is de locatie van een aantal schades uit het inspectierapport weergegeven. Zowel wanddikte afname als gevolgen van zetting spelen een rol.



Figuur 7.34: Locatie schades uit inspectierapport.

7.3 Bijzonderheden overige cases

Dezelfde figuren als voor de leiding Almere in vorige paragraaf zijn voor de overige leidingen (cases) te vinden in Bijlage C. Bij sommige leidingen geven de resultaten aanleiding tot verdere duiding van de resultaten.

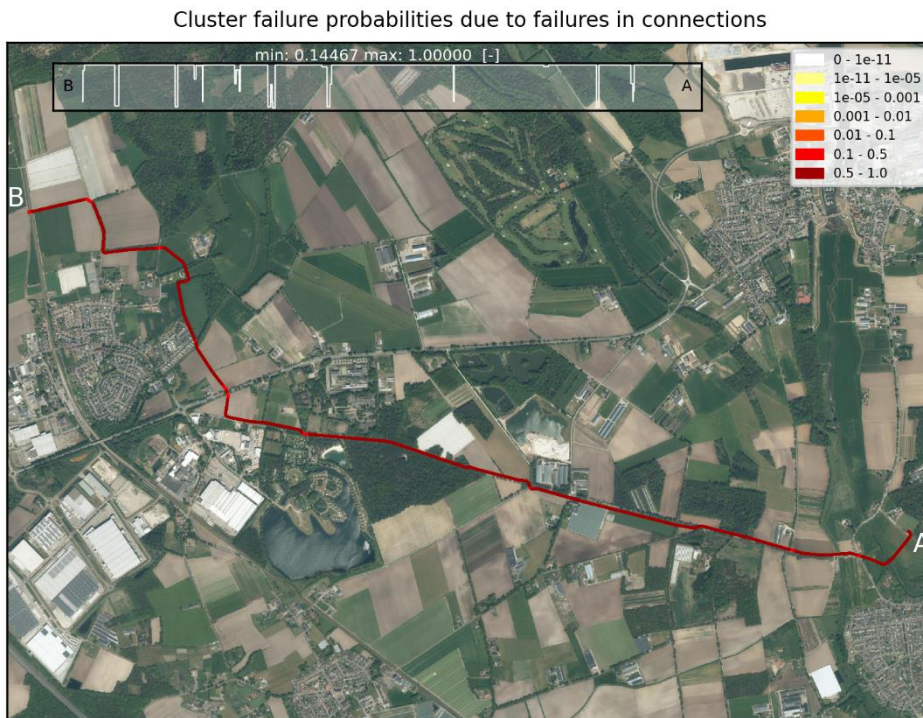
7.3.1 Meerlo – Oostrum

Voor Meerlo-Oostrum zijn de faalkansberekeningen met het fysisch faalkansmodel twee keer uitgevoerd. De eerst keer is aangenomen dat alle leidingdelen van AC met korte komeetmoffen verbonden zijn. Vaak is onbekend wat het type verbinding is wat is gebruikt bij het ontwerp. Een korte komeetmof is dan een conservatieve aanname, omdat dit type verbinding minder grote hoekverdraaiingen en verplaatsingen aan kan. Voor Meerlo-Oostrum worden in dit geval een relatief (t.o.v. de andere cases) zeer hoge faalkansen berekend voor de verbindingen; per cluster 0,14 – 1. Dit is aanleiding de faalkans van de verbindingen voor deze case nader te beschouwen.

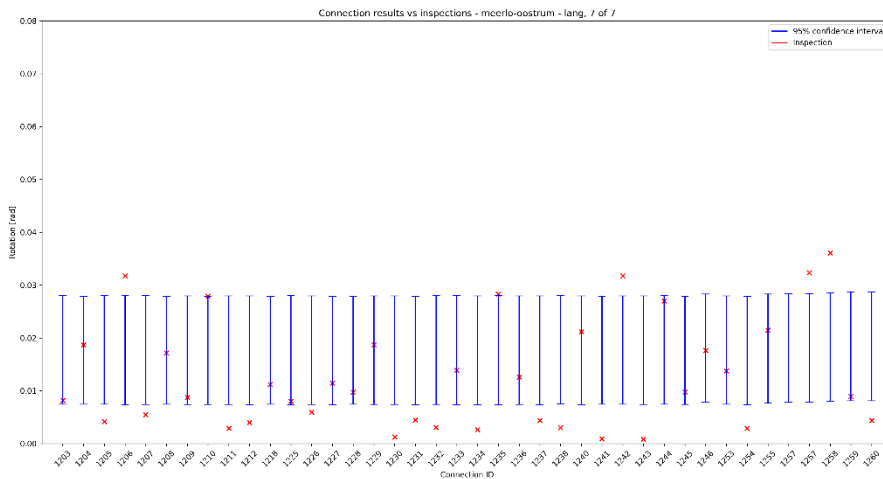
In figuur 7.35 is te zien dat voor grote delen van de leiding een faalkans groter dan 0,5 uitgerekend wordt. Dit zou betekenen dat, volgens het model, de verbindingen van de leiding in 2030 vrijwel zeker falen op meerdere plaatsen. In figuur 7.36 zijn de berekende en gemeten hoekverdraaiingen ter plaatse van de verbindingen te zien voor een deel van de leiding in het jaar van inspectie (2021). Te zien valt dat de berekende hoekverdraaiingen redelijk overeenkomen met de inspectie voor dit deel van de leiding. Hetzelfde geldt voor de verplaatsingen zoals te zien is in Bijlage C.2. Voor sommige delen van de leiding is het faalkansmodel iets conservatief in de berekende verdraaiingen en verplaatsingen, maar klopt de orde-grootte nog steeds. Het is ook mogelijk dat de aannames aan de capaciteitskant (weerstand) voor deze leiding niet juist zijn.

De berekeningen zijn daarom nog een keer uitgevoerd, maar dan met de eigenschappen voor lange komeetmoffen. De resulterende faalkansen voor de koppelingen op clusterniveau in 2030 zijn weergegeven in figuur 7.37. Te zien valt dat de faalkansen nu enkele orde-grootte lager zijn voor de grootste delen van de leiding. Slechts een zeer kort stuk van de leiding heeft nu nog een faalkans groter dan 0,5. Voor de grootste delen van de leiding is de faalkans voor de koppelingen nu kleiner dan E-03 of zelfs kleiner dan E-05. Dit toont het belang aan van de juiste invoergegevens voor de leiding.

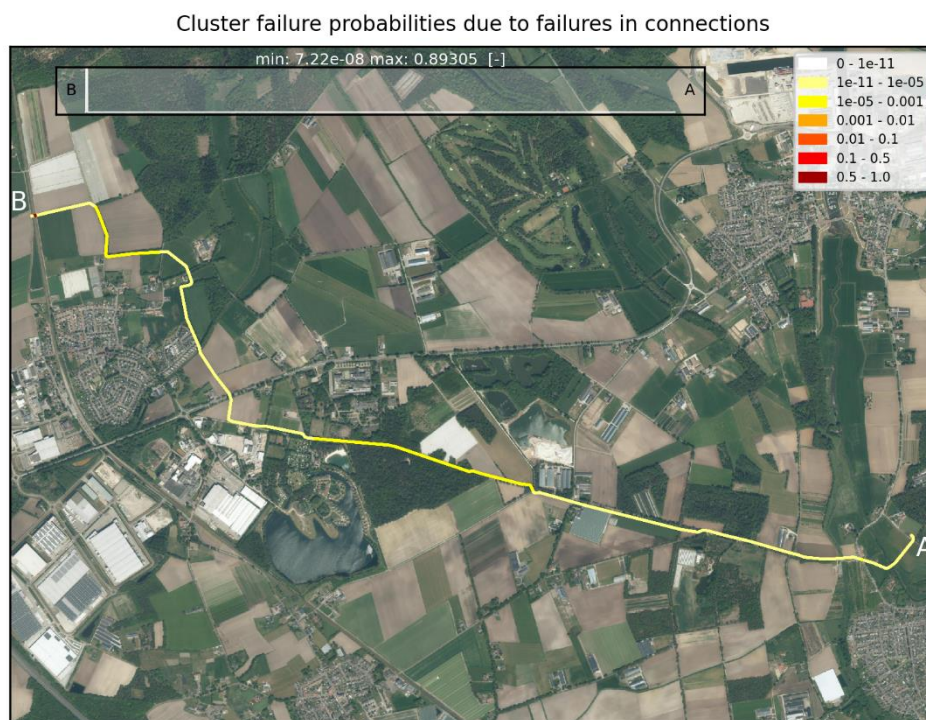
De reden dat deze conservatieve aanname voor korte komeetmoffen vooral bij Meerlo – Oostrum op speelt is dat deze leiding een grote diameter heeft, namelijk 700 behoudens een klein deel beton van 1050 mm. Een leiding met een grote diameter is extra gevoelig, omdat relatief kleine zettingsverschillen leiden tot hoekverdraaiingen, welke gegeven de grote diameter leiden tot grote verplaatsingen in de koppelingen aan de boven- en onderzijde van de leidingbuis veroorzaken.



Figuur 7.35: Meerlo-Oostrum: faalkans koppelingen per cluster in 2030.



Figuur 7.36: Meerlo-Oostrum: gemeten en gemiddelde rotaties (95% onzekerheidsband) ter plaatse van de koppelingen in radialen voor deel 7 van de leiding in 2021.

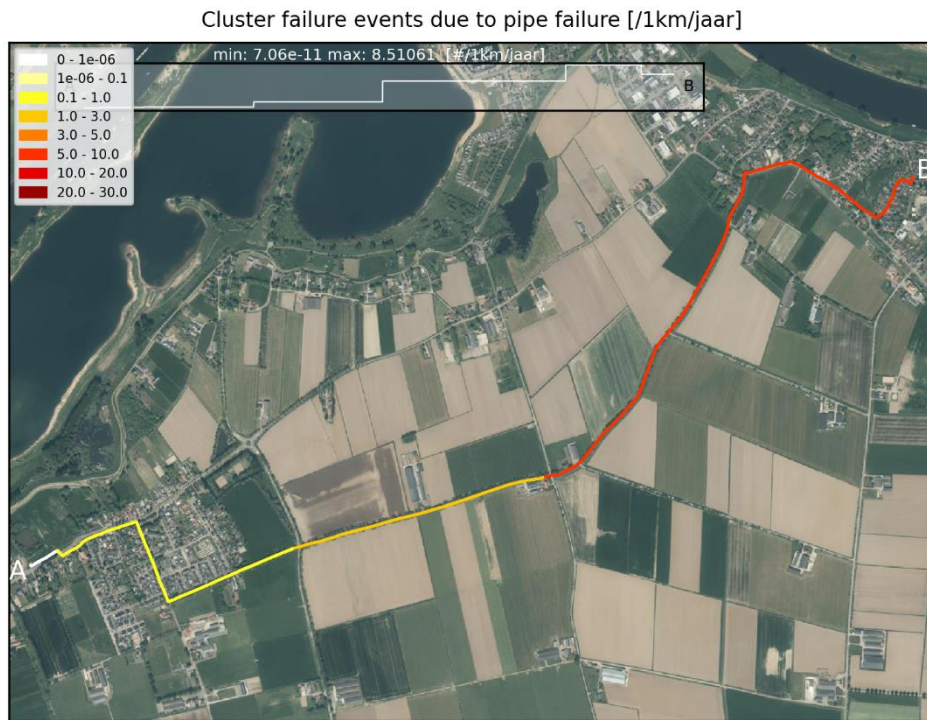


Figuur 7.37: Meerlo-Oostrum, lange komeetmoffen: faalkans koppelingen per cluster in 2030.

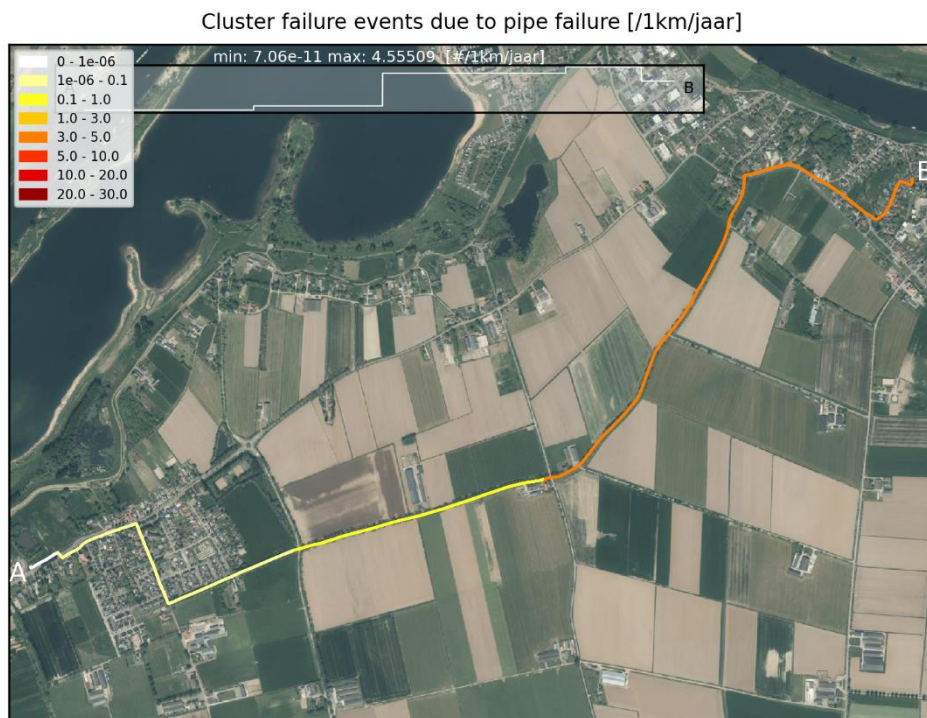
7.3.2 Maren Kessel - Lith

Ook voor Maren Kessel – Lith zijn de berekeningen twee keer uitgevoerd en laten de resultaten zien dat de aannames die gedaan worden voor de leidingeigenschappen van grote invloed zijn op de berekende faalkans. In eerste instantie was de aangenomen initiële wanddikte voor de AC-leidingdelen 15 mm. De beschikbare gegevens van de leiding, zoals ontwerptekeningen, waren hierover namelijk niet duidelijk. De berekende faalfrequentie voor de gehele leiding met het fysisch model is in dit geval 3,4 gebeurtenissen/km/jaar. In figuur 7.38 is de faalfrequentie per cluster weergegeven. Hierin valt op dat voor sommige delen van de leiding frequenties groter dan 5,0 worden berekend.

Uit een nadere raadpleging van het inspectierapport bleek echter dat een initiële wanddikte van 21 mm voor de AC-leidingdelen aannemelijker is. De berekening is opnieuw uitgevoerd en de totale faalfrequentie is in dat geval 2,1 en uit figuur 7.39 blijkt dat nu voor grote delen van de leiding een frequentie tussen 1,0 en 3,0 gevonden wordt. Ook hier blijkt een aanname in de leidingeigenschappen van grote invloed op de berekende faalkansen.



Figuur 7.38: Maren-Kessel-Lith: faalfrequentie per cluster [aantal gebeurtenissen / km / jaar] in 2030.

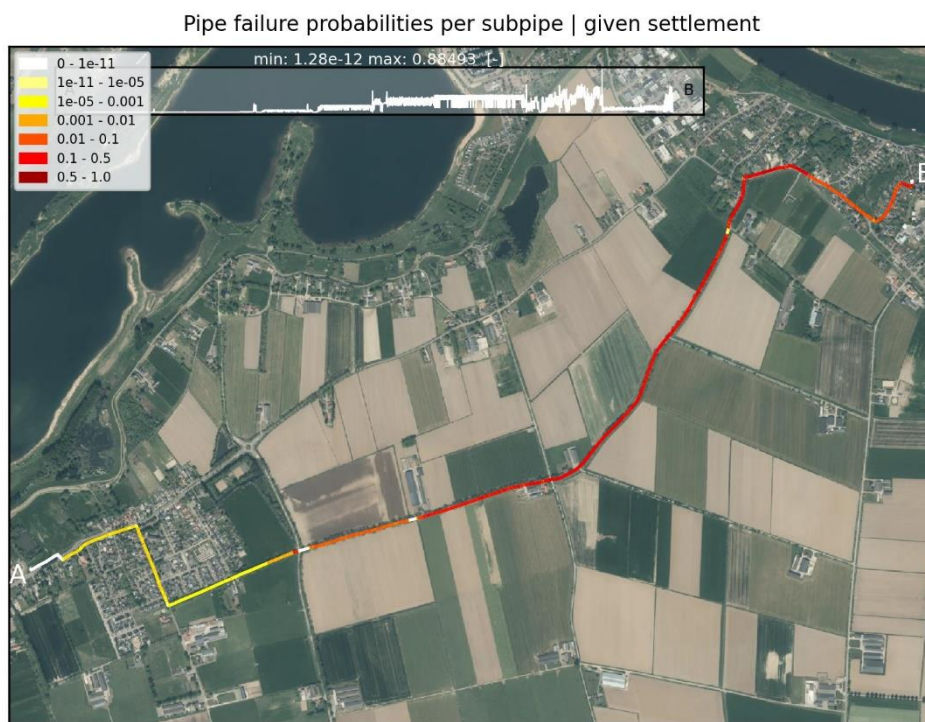


Figuur 7.39: Maren Kessel-Lith: faalfrequentie per cluster [aantal gebeurtenissen / km / jaar] in 2030.

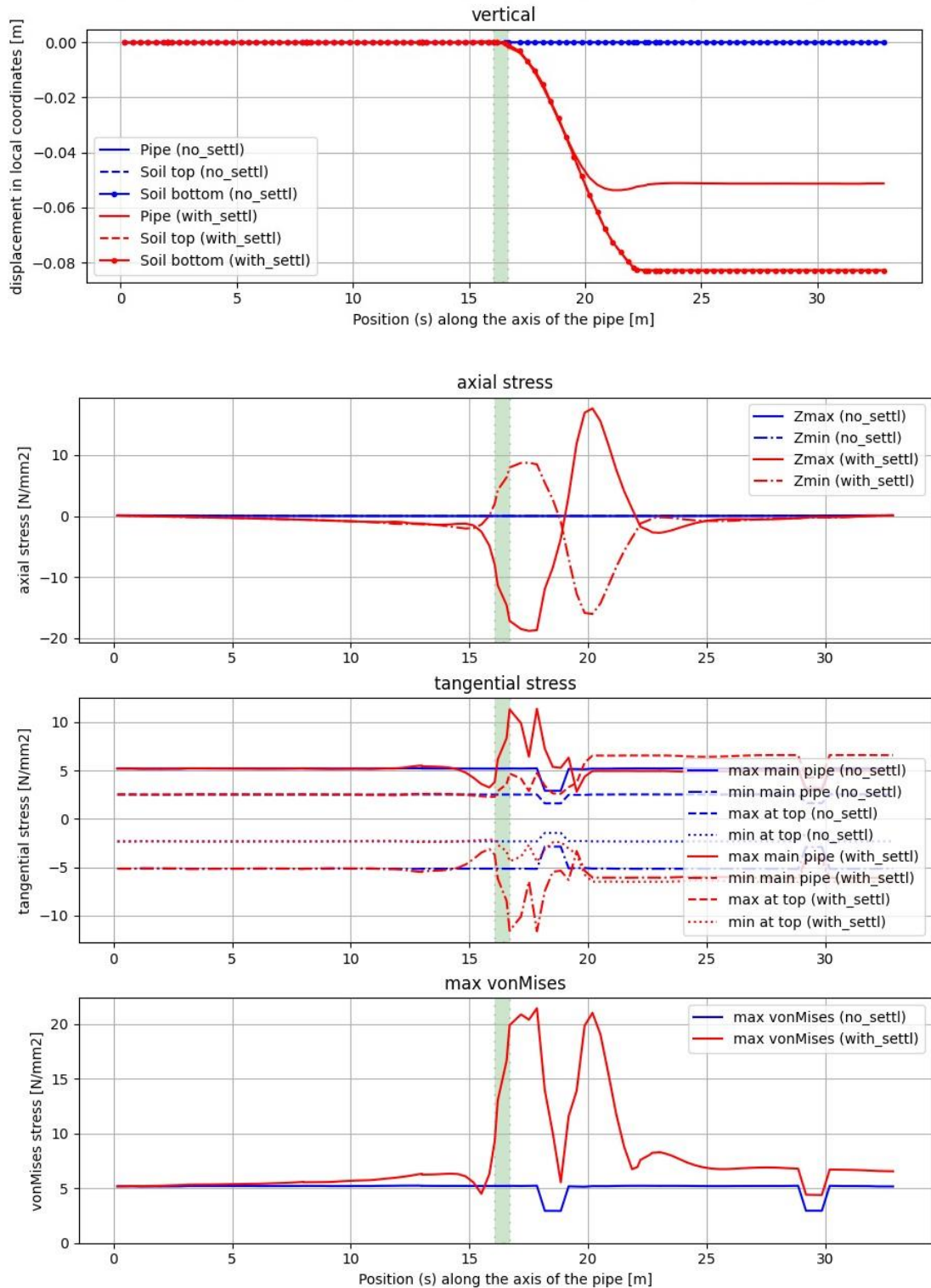
De berekende faalkansen zijn echter nog steeds hoog, zoals te zien in figuur 7.40 met conditionele faalkansen per leidingstukje. De zettingsgevoeligheid van deze leiding is echter gemiddeld vergeleken met de andere leidingen en ook de wanddikteafname door H₂S aantasting en uitloging zijn niet extreem groot. Wanneer de berekende spanningen en faalkansen voor de verschillende scenariocombinaties nader bekeken worden, is te zien welke faalmechanismen maatgevend zijn voor deze leiding. De maximale spanningen (en faalkansen) worden berekend in axiale richting wanneer een zettingsverschil begint ter plaatse van het meest kritische leidingstukje (zie bovenste figuur 7.41). De optredende axiale spanning is in dat geval 18 N/mm². De toegestane (trek)spanning voor asbestcement leidingelementen is 12 N/mm² voor axiale spanningen en 24 N/mm² voor tangentiële spanningen (karakteristieke waarden; gemiddelde waarden zijn respectievelijk 14 N/mm² en 28 N/mm²).

Voor alle scenariocombinaties met de zetting volgens de gemiddelde en maximale scenario's is de berekende axiale spanning groter dan 14 N/mm² en wordt dus een grote faalkans berekend. De maximale faalkansen worden berekend voor het maximale zettingsscenario in combinatie met een maximale wanddikteafname door uitloging, hoewel de kans op voorkomen van deze scenariocombinaties natuurlijk wel klein is. De laagste spanning die voor het leidingstukje gevonden wordt is ongeveer 10 N/mm², gegeven het minimale zettingsscenario. Ook bij deze spanning volgt een niet te verwaarlozen faalkans van ongeveer 0,07. De maximale spanning in de leiding zonder zettingsverschil is 0,10 N/mm². Geconcludeerd kan worden dat deze leiding toch gevoelig is voor opgelegde zettingsverschillen, al zijn deze gemiddeld. In combinatie met de wanddikteafname door uitloging die vergeleken met de initiële wanddikte aanzienlijk is, resulteert dit in relatief grote faalkansen. Daarnaast is het verwacht aantal zettingen per leidingcluster voor de meeste leidingclusters en zettingsscenario's groter dan 2. Dit telt door in de verwachte faalfrequentie per leidingcluster (zie voor meer info over faalfrequenties Bijlage B.2). Het verschil met bijvoorbeeld Mill – Achterdijk, waar de wanddikteafname vergeleken met de initiële wanddikte van dezelfde orde is, is met name de zettingsgevoeligheid. Ook het verwachte aantal zettingsverschillen is voor deze leiding voor de meeste clusters lager wat ook resulteert in een lagere faalfrequentie. Het is in dit geval de combinatie van faalmechanismen die leidt tot hoge faalkansen en daarnaast het verwacht aantal zettingsverschillen per cluster die leidt tot een hoge faalfrequentie.

Uit de verplaatsingen in het bovenste figuur van figuur 7.41 kan nog opgemerkt worden dat het rechter deel van de leiding een aantal centimeters minder zakt dan de grond. De bovenkant van de grond ligt in dit geval los op de leiding. De grond zelf is dus bezweken en de leiding hangt als het ware boven de grond voor de maatgevende scenariocombinaties.



Figuur 7.40: Maren Kessel-Lith: faalkansen per meter leiding gegeven een zettingsverschil aanwezig ter plaatse van het leidingstukje in 2030.



Figuur 7.41: Maren Kessel - Lith: maximale verplaatsingen van de grond en de leiding verticale richting (eerste figuur), berekende axiale (tweede), tangentiële (derde) en von Mises spanningen (vierde figuur) voor de meest kritische scenario combinatie voor leidingstukje 3735 (locatie van het leidingstukje is groen gearceerd).

7.3.3 Falen koppelingen Hoeven, Heiligenberg en Almere

Voor enkele leidingen worden hoge faalkansen voor de verbindingen gevonden, met name voor Hoeven, Heiligenberg en Almere. Om deze faalkansen te beoordelen, is nader gekeken naar de gevonden hoekverdraaiingen en verplaatsingen en de koppelingseigenschappen (zie bijlage A.2).

Leiding Hoeven heeft een diameter van 800 mm en voor betonnen mof-spieerverbindingen met deze afmeting wordt een maximale hoekverdraaiing van 1,5 graden aangehouden met een spreiding van 5%. Het eenvoudige model voor de initiële verplaatsingen van de leiding gaat uit van een gemiddelde hoekverdraaiing van 1 graden met een spreiding van 30%. Ook hier geldt dat het model voor initiële verplaatsingen van de leiding, mogelijk aan de conservatieve kant is en nadere beschouwing in een volgende fase wordt aanbevolen. Het is dan ook logisch dat er een hoge faalkans wordt uitgerekend. Voor Hoeven zijn geen inspectiegegevens beschikbaar. Een vergelijking van de aangehouden en werkelijke hoekverdraaiingen is dan ook niet mogelijk.

In het geval van leiding Heiligenberg is er voor een groot deel van de leiding sprake van asbestcement met een diameter van 600 mm met mof-spieerverbindingen. Het is onbekend of er sprake is van korte of lange komeetmoffen. Net zoals bij leiding Meerlo – Oostrum wordt conservatief uitgegaan van korte komeetmoffen. Voor deze komeetmoffen wordt een maximale verplaatsing in axiale richting aangehouden van 11 mm (met een spreiding van 5%). Het eenvoudige model voor de initiële verplaatsingen van de leiding gaat uit van een gemiddelde verplaatsing van 10 mm met een spreiding van 30%. Ook in dit geval zijn de hoge faalkansen dus logisch. Het inspectierapport van Heiligenberg spreekt ook van korte komeetmoffen. Daar wordt echter een grenswaarde van 54 mm gehanteerd, waardoor zij concluderen dat de voegen niet falen. Uit de vergelijking met inspectieresultaten is gebleken dat de gemodelleerde hoekverdraaiingen en voegwijdtes voor delen van de leiding redelijk kloppen met geïnspecteerde waarden en voor andere delen iets conservatief zijn (dus iets groter aangenomen dan werkelijk aanwezig), zie bijlage C.6.2. Aangezien er geen lekkages zijn geconstateerd, zijn de gehanteerde grenswaarden mogelijk aan de conservatieve kant, vooral voor de toegestane voegwijdte.

Voor leiding Almere geldt voor een groot deel van de leiding dezelfde uitgangspunten als voor Heiligenberg qua materiaal, diameter en gehanteerde grenswaarden. Bovenstaande conclusies gelden dan ook voor Almere. Bij deze leiding is echter ook nog sprake van grote zettingsverschillen waardoor ook grote hoekverdraaiingen resulteren van meer dan 3,5 graden, terwijl een maximale hoekverdraaiing voor korte komeetmoffen met deze diameter van 2,5 graden wordt aangehouden. Tijdens inspectie van deze leiding zijn ook grote hoekverdraaiingen waargenomen.

8 Valorisatie proof of concept

De valorisatie van het proof of concept bestaat uit twee aspecten:

- Overdraagbaarheid en praktische toepasbaarheid: Is het mogelijk om het faalkansmodel op meerdere cases met een range van materialen, diameters en dominante faalmechanismen toe te passen?
- Validatie berekende faalkansen: komen de berekende faalkansen wat orde van grootte betreft overeen met hetgeen verwacht mag worden op basis van ervaringen uit de praktijk?

8.1 Overdraagbaarheid en praktische toepasbaarheid

Het faalkansmodel is doorontwikkeld en toegepast op 10 cases met verschillende materialen en diameters, verschillend hydraulisch functioneren en verschillende zettingssnelheden. Het bleek niet noodzakelijk om case specifieke aanpassingen te doen om het faalkansmodel te kunnen inzetten. Daarnaast zijn de fysische modellen waarmee het faalkansmodel per combinatie van belastingen en degradatie of veroudering berekent of de leiding faalt, gebaseerd op bestaande software van Deltares en TNO, zoals WANDA, D-Settlement, D-Geopipeline en W-TUBE. Voor deze software geldt dat deze al uitgebreid is gevalideerd en binnen het faalkansmodel binnen het geldige gebruiksgebied worden ingezet.

Uit de cases kwam naar voren dat de praktische toepasbaarheid sterk samenhangt met de wijze waarop de beheerders de persleidinggegevens beheren. Het gaat daarbij om gegevens over de leiding zelf, zoals jaar van aanleg, ligging, materiaal, diameter, drukklasse en om gegevens die benodigd zijn om een WANDA model op te kunnen stellen, zoals kenmerken van pompen, schakelingen en appendages als afsluiters en ontluchters. Hoe beter het databeheer op orde is, hoe minder tijd er nodig is om de fysische modellen op te stellen. Goed databeheer betekent gebruik van datastandaarden EN het daarin beschikken over de benodigde informatie, zoals bijvoorbeeld een Z-waarde (diepteligging persleiding) voor elke meter leiding in plaats van alleen het begin en eind van een segment in het beheerpakket.

8.2 Validatie berekende faalkansen

Uit de incidentenregistratie van persleidingincidenten van het afgelopen decennium komt het beeld naar voren dat de huidige faalkansen op ongeveer 1,5 keer falen per 100 km per jaar ligt. Het faalkansmodel rekent 144 combinaties van sterkte en belasting door en berekent door de uitkomsten van deze 144 combinaties onderling te wegen een faalkans per meter leiding. Deze faalkans wordt in de modeluitvoer bepaald voor relevante leidingsecties en uitgedrukt in een faalkans per km leiding in het doorgerekende jaar. De faalkans uit de praktijk geldt voor het gehele areaal en niet per specifiek stukje leiding, waardoor een direct vergelijk van de berekende faalkansen met faalkansen uit de praktijk onmogelijk is.

Wel is het mogelijk om, zoals opgenomen in hoofdstuk 7 bij de beschouwing van de modelresultaten, te verifiëren in hoeverre de uitkomsten van de onderliggende fysische rekenmodellen overeen komen met de in de praktijk in inspecties of bodemdalingsmetingen waargenomen leidingdrukken, (verschil-)zettingen en daarmee samenhangende hoekverdraaiingen, uitloging en aantasting. Deze onderliggende resultaten blijken goed overeen te komen met de praktijkwaarnemingen. Daarmee is het faalkansmodel ook goed in staat om de meest kwetsbare locaties per persleiding aan te geven en om onderlinge verschillen in faalkans tussen verschillende persleidingen te berekenen.

Op basis van de bevindingen uit hoofdstuk 7 is geconcludeerd dat de berekende faalkansen realistisch zijn en de juiste orde van grootte hebben. Zodra veel meer leidingen met het faalkansmodel zijn doorgerekend wordt het mogelijk om de kansverdelingen die achter te 144 doorgerekende combinaties liggen te tunen om te zorgen dat de berekende kansen in kwantitatief opzicht zo dicht mogelijk op de praktijk komen. Daarnaast is het ook mogelijk om naar aanleiding van uitgevoerde inspecties deze kansverdelingen, maar ook de invoerwaarden zelf te tunen, zodat ze overeenkomen met de tijdens inspectie waargenomen situatie. Zo ontstaat vanaf het moment van inspectie weer een nieuw startpunt aan invoerwaarden om vervolgens weer voorspellingen voor de toekomst te kunnen doen.

9 Conclusies en vooruitblik

9.1 Conclusies

In dit proof of concept project is de tweede versie van het faalkansmodel persleidingen ontwikkeld. Het onderzoek heeft plaatsgevonden binnen TKI Deltatechnologie met kennispartners TNO, Deltares en Partners4UrbanWater met financiering en commitment van persleidingbeheerders Gemeente Rotterdam, Waternet en Waterschap Aa en Maas, Schmidt Watertechniek en STOWA en RIONED.

Het faalkansmodel persleidingen is een bijzonder model, omdat het een probabilistische, fysisch gebaseerde aanpak voor faalmechanismen waarvoor het onderliggende fysische proces bekend is combineert met een statistische aanpak voor faalmechanismen die meer ad hoc kunnen optreden.

Voor de beschrijving van de onderliggende fysische (verouderings)processen, zoals zetting, wanddikte afname en hydraulische overbelasting is gebruik gemaakt van bestaande software van Deltares, waaronder WANDA, D-settlement en D-geopipeline. Voor het berekenen van het falen van leidingmateriaal en verbindingen is gebruik gemaakt van het TNO model W-tube. Met dit rekenmodel is het mogelijk om voor elke meter leiding de optredende spanningen te berekenen en te bepalen of dit boven de actuele sterkte uitkomt. W-tube vraagt veel rekenkracht en de doorbraak in dit project is bereikt door W-tube berekeningen in de cloud parallel uit te voeren. Dit maakt het mogelijk om een groot aantal (144) combinaties van belastingen en sterktes in detail door te rekenen. De ontwikkelde statistische modellen voor falen van ontluchters en schade door derden zorgen dat ook deze faaloorzaken meegenomen kunnen worden. Het faalkansmodel levert het resultaat op in de vorm van shapefiles, zodat beheerders deze resultaten direct kunnen combineren met andere beheerinformatie. Ook is het mogelijk om de berekende kans te combineren met de mogelijke effecten en zo te komen tot een goed onderbouwde risico analyse.

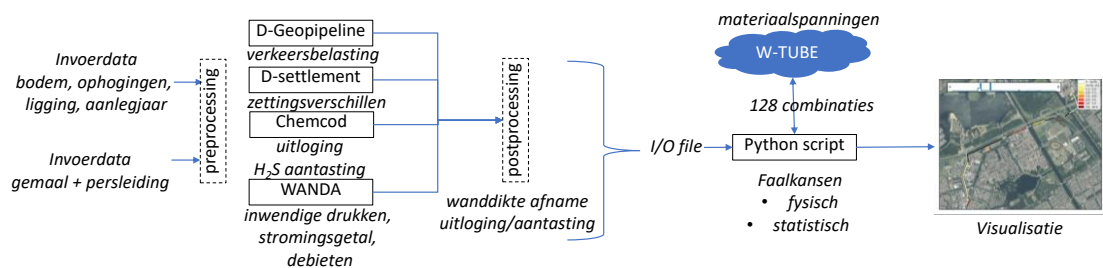
Het faalkansmodel is toegepast op 10 cases met uiteenlopende grondslag, leidingdiameters en materialen, leeftijden en hydraulische kenmerken. In alle gevallen bleek het goed mogelijk om met het faalkansmodel de faalkansen te bepalen en konden de door het faalkansmodel bepaalde dominante processen bevestigd worden uit leidinginspecties. Daarnaast bleek dat het faalkansmodel erg gevoelig is voor de kwaliteit van de invoerdata. De initiële wanddikte en het type verbinding werken direct zichtbaar door in de uitkomsten, hetgeen de mogelijkheid biedt voor de beheerder om deze gegevens te verifiëren en daarmee de kwaliteit van de rekenresultaten te verhogen.

Het faalkansmodel biedt niet alleen de basis voor een accurate inschatting van de faalkans, maar biedt ook te mogelijkheid om de beheerder inzicht te geven in het dominante faalmechanisme per leidingsectie. Dit inzicht kan de beheerder gebruiken om maatregelen zoals vervanging of relining op te baseren, inspecties op te plannen of om mogelijke oorzaken van falen weg te nemen, zoals het voorkomen van te grote onderdruk door maatregelen tegen waterslag.

De conclusie is dat het faalkansmodel persleidingen leidt tot realistische faalkansen en bovendien inzicht in de onderliggende processen. Dit maakt dat het faalkansmodel een krachtig middel is om het professioneel beheer van persleidingen te ondersteunen.

9.2 Vooruitblik

Het faalkansmodel persleidingen is ontwikkeld met het oog op toepassing in de praktijk. Het faalkansmodel is echter geen kant en klaar software pakket, maar meer een met diverse python scripts ondersteund werkproces waarin bestaande software van Deltares en TNO worden benut. Figuur 9.1 toont dit werkproces op hoofdlijnen.



Figuur 9.1: Werkprocessen en gebruikte software binnen faalkansmodel persleidingen.

Op basis van de feedback van de begeleidingscommissie op 5 december 2023 en de positieve ontvangst van het faalkansmodel op de STOWA/RIONED persleidingenbijeenkomst van 6 december 2023 is het plan opgevat om een Community of Practice (CoP) op te richten of toe te voegen aan CAPWAT, waarin gebruikers van het faalkansmodel kennis en ervaring kunnen delen en waarbinnen de gebruikers hiertoe worden opgeleid. In eerste instantie wordt daarbij gedacht aan medewerkers van adviesbureaus die actief zijn op het vakgebied persleidingen en aan medewerkers van beheerders die zelf modelberekeningen uitvoeren. Om dit mogelijk te maken zal een projectvoorstel gedaan worden voor fase 3 proof-of-productibility, waarin een groot aantal beheerders de vraagkant zal verzorgen en genoemde uitvoerders de aanbodkant. Het consortium TNO-Deltares-Partners4UrbanWater zal zorgen voor opleiding, doorontwikkeling van de software en interfaces en het beheer van het faalkansmodel gedurende een periode van tenminste 5 jaar.

10 Referenties

- [1] La Gasse, L., Courage, W., Abspoel, L., Kruse, H., Clemens, F., Langeveld, J. (2019). Faalkansmodel persleidingen – Proof of Principle, TNO 2019 R10463
- [2] Ministry of Economic Affairs and Climate Policy, “WIBON En Schade Door Graven.” (2022). <https://www.agentschaptelecom.nl/binaries/agentschap-telecom/documenten/publicaties/2022/05/31/feiten-en-cijfers-over-schade-door-graafwerkzaamheden-2021/Infographic+WIBON+en+schade+door+graven+2021.pdf>.
- [3] Gemeente Rotterdam, Stichting RIONED, STOWA. Ontwikkeling van een beoordelingsmodel voor de hoofdpersleidingen van gemeente Rotterdam, 2013.
- [4] NEN 9997-1+C1 (nl) Geotechnisch ontwerp van constructies - Deel 1: Algemene regels. Nederlands Normalisatie Instituut, 2012.
- [5] NEN-EN 1997-1+C1+A1/NB (nl) Nationale bijlage bij NEN-EN 1997-1 Eurocode 7: Geotechnisch ontwerp - Deel 1: Algemene regels. Nederlands Normalisatie Instituut, 2016.
- [6] NEN 3650-1 (nl) Eisen voor buisleidingsystemen - Deel 1: Algemene eisen. Nederlands Normalisatie Instituut, 2012.
- [7] CUR rapport 122: Buizen in de grond, berekening van ongewapende en gewapende betonnen buizen; 1985.
- [8] JCSS Probabilistic Model Code, Section 3.7: Soil Properties. Joint Committee of Structural Safety, 2006.
- [9] JCSS Probabilistic Model Code, Section 3.9: Model Uncertainties. Joint Committee of Structural Safety, 2006.
- [10] Langeveld, J., Makris, K., en Post, J. (2023). Professioneel persleidingenbeheer: Handreiking inventarisatie en inspectie van persleidingen - STOWA/Stichting RIONED 2023-09
- [11] Post, J.A.B. en Langeveld, J.G (2023). STUIP: STandaard voor Uniforme Incidentenregistratie Persleidingen - STOWA/Stichting RIONED 2023-18

11 Ondertekening

TNO | Mobility & Built Environment | Delft, 15 januari 2024

Ir. L.C. la Gasse
Auteur

Dr.ir. W.M.G. Courage
Auteur

A.I. Martinez Colán
Auteur

Dr. H.M.G. Kruse (Deltares)
Auteur

D. Nugroho (Deltares)
Auteur

Dr.ir. J.G. Langeveld (Partners4UrbanWater)
Auteur

J. Post (Partners4UrbanWater)
Auteur

K.F. Makris (Partners4UrbanWater)
Auteur

Ir. L.M. Abspoel-Bukman
Project manager

Ir. M. van Roermund
Research manager
Reliable Structures

Mobility & Built Environment

Molengraaffsingel 8
2629 JD Delft
www.tno.nl

TNO innovation
for life